FÍSICA 3

OS FUNDAMENTOS DA FÍSICA

RAMALHO • NICOLAU • TOLEDO

Francisco Ramalho Junior

Professor de Física em cursos pré-vestibulares.

Nicolau Gilberto Ferraro

Licenciado em Física pelo Instituto de Física da Universidade de São Paulo (USP). Engenheiro metalurgista pela Escola Politécnica da USP. Professor de Física em cursos pré-vestibulares e em escolas do Ensino Médio e Superior.

Paulo Antônio de Toledo Soares

Médico diplomado pela Faculdade de Medicina da Universidade de São Paulo (FMUSP). Professor de Física em cursos pré-vestibulares e em escolas do Ensino Médio.

10ª edição

Moderna PLUS

Coordenação de Projeto e Inovação: Sérgio Quadros, Sandra Homma
Coordenação editorial: Rita Helena Bröckelmann
Edição de texto: Alexandre Braga D'Avila (coordenação), Edna Emiko Nomura, Tomas Masatsugui Hirayama, Erich Gonçalves da Silva, Eugenio Dalle Olle, Horácio Nakazone, Luciana Ribeiro Guimarães, Caio Alencar de Matos
Assistência editorial: Denise Minematsu, Paula Paschoalick
Coordenação de *design* e projetos visuais: Sandra Homma
Projeto gráfico e capa: Everson de Paula, Marta Cerqueira Leite
Foto: Telescópio Hubble - © Dorling Kindersley/ Getty images
Coordenação de produção gráfica: André Monteiro, Maria de Lourdes Rodrigues
Coordenação de revisão: Elaine C. del Nero
Revisão: Alexandra Costa, José Alessandre da Silva Neto, Márcia Leme, Nelson de Camargo
Coordenação de arte: Wilson Gazzoni Agostinho
Edição de arte: Fernanda Fencz, A+ Comunicação
Ilustrações: Adilson Secco, Éber Evangelista, Nelson Matsuda, Studio Caparroz
Assessoria de projetos visuais: William Hiroshi Taciro
Edição de infografia: Erich Gonçalves da Silva, Alexandre Braga D'Avila, Tomas Masatsugui Hirayama, Eugenio Dalle Olle
Cartografia: Alessandro Passos da Costa
Editoração eletrônica: Grapho Editoração
Coordenação de pesquisa iconográfica: Ana Lucia Soares
Pesquisa iconográfica: Angélica Nakamura, Camila D`Angelo, Flávia Aline de Morais, Thais R. Semprebom, Vera Lucia Barrionuevo
As imagens identificadas com a sigla CID foram fornecidas pelo Centro de Informação e Documentação da Editora Moderna
Coordenação de *bureau*: Américo Jesus
Tratamento de imagens: Alexandre Petreca, Fabio N. Precendo, Rubens N. Rodrigues
Pré-impressão: Everton L. de Oliveira, Helio P. de Souza Filho, Marcio H. Kamoto
Coordenação de produção industrial: Wilson Aparecido Troque
Impressão e acabamento:

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Ramalho Junior, Francisco
Os Fundamentos da Física / Francisco Ramalho Junior, Nicolau Gilberto Ferraro, Paulo Antônio de Toledo Soares. — 10. ed. — São Paulo : Moderna, 2009.

Conteúdo: V. 1. Mecânica — V. 2. Termologia, óptica e ondas — V. 3. Eletricidade, introdução à física moderna e análise dimensional.
Bibliografia.

1. Física (Ensino médio) 2. Física (Ensino médio) – Problemas, exercícios etc. I. Ferraro, Nicolau Gilberto. II. Soares, Paulo Antônio de Toledo. III. Título.

09-07089 CDD-530.7

Índices para catálogo sistemático:
1. Física : Estudo e ensino 530.7

ISBN 978-85-16-06338-2 (LA)
ISBN 978-85-16-06339-9 (LP)

EDITORA MODERNA LTDA.
Rua Padre Adelino, 758 - Belenzinho
São Paulo - SP - Brasil - CEP 03303-904
Vendas e Atendimento: Tel. (0_ _11) 2602-5510
Fax (0_ _11) 2790-1501
www.moderna.com.br
2009
Impresso no Brasil

1 3 5 7 9 10 8 6 4 2

Apresentação

Nesta coleção, a Física é apresentada como uma ciência moderna e profundamente inserida em sua vida. Estudá-la, paralelamente às demais disciplinas, é um compromisso que você tem consigo mesmo, a fim de se desenvolver como cidadão, apto a contribuir, com seus conhecimentos e uma formação científica bem estruturada, para o progresso da sociedade em que vive.

Além de desenvolver o conteúdo básico de Física estabelecido para o Ensino Médio, procura-se nesta obra relacionar as leis e os fenômenos físicos ao dia a dia e ao desenvolvimento de processos tecnológicos. A exposição teórica de um assunto vem sempre acompanhada por **exercícios resolvidos**, cuja finalidade é analisar, elucidar e mesmo ampliar a teoria apresentada. Com objetivo semelhante ao dos exercícios resolvidos, há **exercícios propostos**, para que você possa exercitar e assimilar os itens teóricos. Há ainda **Exercícios propostos de recapitulação**, que, além de um grau de dificuldade maior que os anteriores, têm por objetivo revisar e complementar os assuntos abordados. No final de cada capítulo, você encontra os **testes propostos**, ordenados de acordo com a exposição da teoria. **Exercícios especiais**, presentes em alguns capítulos, têm outra finalidade: aprofundar ainda mais os conteúdos e relacioná-los com conceitos vistos anteriormente. Além disso, em toda a obra são incluídas questões de vestibulares, do Enem e das Olimpíadas de Física.

Acompanhando a evolução tecnológica de nossa sociedade, em cada capítulo indicamos endereços eletrônicos (**Entre na rede**), onde você poderá obter informações sobre os diversos assuntos desenvolvidos e trabalhar com animações e simulações de alguns fenômenos estudados.

No **Portal Moderna Plus**, você, aluno, encontra:

- Textos sobre **História da Física**, que situam no tempo os cientistas e seus feitos, com a descrição de seus estudos, suas pesquisas e suas descobertas, revelando que a ciência está em constante desenvolvimento. Complementando a biografia, criamos o item **Enquanto isso...**, em que fazemos breves considerações a respeito de personalidades importantes do período, em diferentes ramos de atividade.
- **A Física em nosso Mundo**, que são leituras especiais indicadas no final de cada capítulo, com a finalidade de mostrar que essa ciência está fortemente relacionada com a vida e o cotidiano do ser humano. Após cada uma dessas leituras, sugerimos novos exercícios em **Teste sua leitura**, para que você possa aplicar os conhecimentos apresentados no texto.
- **Atividades experimentais**. A intenção desses experimentos é propiciar a você que "ponha a mão na massa", estabelecendo assim um vínculo mais profundo com a Física. Com isso, será mais fácil compreender os pilares dessa ciência e, assim o desejamos, fascinar-se com ela.

Ramalho, Nicolau e Toledo

ORGANIZAÇÃO DIDÁTICA

A Coleção *Moderna Plus Física* é composta de três livros. O conteúdo de cada ano letivo é encadernado separadamente em três partes: Parte I, Parte II e Parte III, que serão utilizadas em um ano letivo. Assim, você leva para a sala de aula apenas a Parte na qual está o conteúdo em estudo.

Abertura de Parte
Cada Parte está organizada em Unidades, com seus respectivos Capítulos.

PARTE I

Unidade A
Cargas elétricas em repouso

Unidade B
Cargas elétricas em movimento

PARTE
I

Abertura de Unidade
No início de cada Unidade há indicação do tema sobre o qual os Capítulos que ela reúne serão trabalhados.

Abertura de Capítulo
Cada abertura de Capítulo apresenta imagem retratando situações cotidianas com a Física ou que propicia a aquisição de informações sobre assuntos relacionados ao Capítulo.

UNIDADE B

Capítulo
9

Geradores elétricos

Gerador elétrico é um elemento de circuito que converte em energia elétrica outras formas de energia.

9.1 Gerador. Força eletromotriz
Os geradores apresentam duas características principais independentemente dos circuitos aos quais estejam ligados: a força eletromotriz e a resistência interna.

9.2 Circuito simples. Lei de Pouillet
A intensidade da corrente que percorre um circuito elétrico simples, do tipo gerador-resistor, é calculada pela lei de Pouillet.

9.3 Associação de geradores
Assim como os resistores, os geradores podem ser associados em série ou em paralelo.

9.4 Estudo gráfico da potência elétrica lançada por um gerador em um circuito
O gráfico da potência lançada pelo gerador em função da intensidade da corrente elétrica que o atravessa é uma parábola.

A balada sustentável
Já imaginou uma balada onde a eletricidade não vem da tomada e sim da animação da galera frequentadora? O segredo está na piezoeletricidade: capacidade que alguns materiais, como o quartzo, têm de gerar energia elétrica ao sofrer deformações.

Para pensar
Quanta energia elétrica poderia ser economizada mensalmente, com uma área de 20 m^2 de coletores fotovoltaicos? Admita uma incidência de radiação solar de 5 $kWh/m^2 \cdot$ dia e que a eficiência dos coletores seja de 16%.

Há uma breve descrição do que será estudado no Capítulo e um foco (objetivo) para cada Seção do Capítulo.

Alguns temas foram destacados com infografias, criando oportunidade para você exercitar a leitura de imagens.

Cada infográfico apresenta algumas questões que possibilitam o estudo do tema proposto.

Leitura
Quadro com ampliação do tema com base em relatos históricos, aplicações e desenvolvimento tecnológico.

Abertura de Seção
Cada Capítulo é organizado em seções. No início de cada Seção existe a descrição dos seus Objetivos e também dos Termos e Conceitos que serão estudados nela. Os Termos e Conceitos serão retomados no *Caderno do Estudante* promovendo revisitação aos temas do Capítulo. Dessa maneira, você tem uma visão geral sobre a Seção que irá estudar.

Conteúdo digital Moderna Plus: ícone com indicação de conteúdo digital no portal do *Projeto Moderna Plus*, como leituras complementares, animações, exercícios extras, simulações e vídeos relativos ao tema estudado.

Entre na rede: sugestões de endereços eletrônicos com mais informações sobre o assunto do Capítulo, além de animações e simulações dos conteúdos trabalhados.

Exercícios resolvidos: têm como função analisar, elucidar e ampliar a teoria apresentada.
Exercícios propostos: propõem o exercício e assimilação dos conteúdos teóricos.
Exercícios propostos de recapitulação: apresentam um grau de dificuldade maior e auxiliam na revisão e complementação dos assuntos abordados.
Testes propostos: questões das provas de vestibulares mais recentes ordenadas de acordo com a exposição da teoria.
Exercícios especiais: questões de aprofundamento que se relacionam com conceitos vistos anteriormente.

SUMÁRIO GERAL

PARTE
I

Unidade A Cargas elétricas em repouso

SUMÁRIO GERAL

PARTE
II

SUMÁRIO GERAL

PARTE III

PARTE I

Unidade A

Cargas elétricas em repouso

Unidade B

Cargas elétricas em movimento

PARTE
I

Capítulo 1

Eletrização. Força elétrica

Eletrização das nuvens

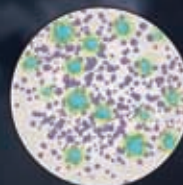
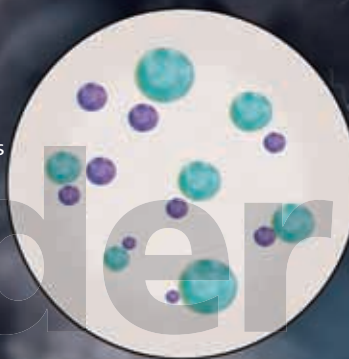
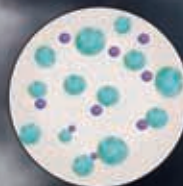
Um fênomeno de rara beleza que pode causar enormes prejuízos; os raios são uma das manifestações naturais mais misteriosas. Várias teorias divergem opiniões quanto a formação dos raios, porém, uma coisa é certa, trata-se de um processo de eletrização..

Sabe-se que matéria em seu estado fundamental é neutra. No entanto, existem processos a partir dos quais os corpos podem se tornar eletrizados. A eletrização pode ser verificada com o uso de dispositivos denominados eletroscópios. Quando eletrizados, os corpos adquirem carga elétrica e entre eles passa a atuar uma força que pode ser atração ou repulsão. Essa força pode ser determinada a partir da lei de Coulomb.

As áreas claras no mapa indicam uma maior incidência de raios.

Em dias muito quentes, massas de ar quente, mais leves, sobem levando a umidade. As massas de ar frio descem, formando uma corrente de convecção.

Com o aumento de cargas nas nuvens, ocorre a ionização do ar, gerando uma descarga elétrica.

Sondas metereológicas, verificaram que os cristais de gelo (menores), adquirem carga elétrica positiva, enquanto o granizo (maiores), adquirem carga negativa.

No interior da nuvens, partículas de gelo (cristais e granizo) colidem entre si, eletrizando-se por atrito, adquirindo carga de sinais contrários.

Essas descargas ocorrem, na sua maioria, no interior da nuvem, mas podem ocorrer de uma nuvem para outra e da nuvem para a terra, e dependendo de onde caem, provocam estragos enormes.

Fatores como os ventos, a temperatura e a gravidade fazem com que cargas de mesmo sinal se concentrem nos extremos da nuvem. Geralmente as cargas negativas se acumulam na base da nuvem.

Para pensar

1. Considere a nuvem eletrizada do infográfico. Que sinal de carga é induzido no solo para que ocorra o raio?
2. Porque os para-raios são eficientes na proteção de descargas elétricas?

Seção 1.1

Eletrização por atrito. Noção de carga elétrica

Objetivos

- Compreender o processo de eletrização por atrito.
- Explicar os fenômenos elétricos a partir da teoria atômica da matéria.

Termos e conceitos

- força nuclear
- corpos eletrizados
- corpos eletricamente neutros
- série triboelétrica

Friccione um bastão de vidro num pedaço de lã. Se o bastão for suspenso por um barbante e o pedaço de lã for aproximado de uma das extremidades (**fig. 1**), o bastão será **atraído**. Se um segundo bastão de vidro for atritado com outro pedaço de lã e aproximado do bastão suspenso, este será **repelido** (**fig. 2**). Suspenda, finalmente, um dos pedaços de lã e aproxime o outro (**fig. 3**). Novamente haverá **repulsão**. Note que as **forças** observadas podem ser de **atração** ou de **repulsão**. Essas forças são, portanto, de natureza diferente das forças gravitacionais, que são sempre atrativas.

Figura 1. O vidro e a lã se atraem.

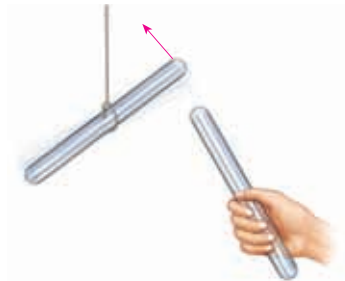



Figura 2. Os bastões de vidro se repelem.

Figura 3. Os pedaços de lã se repelem.

Os antigos gregos já haviam observado esse fenômeno ao atritarem o **âmbar*** com outros corpos. Como, em grego, **âmbar** significa *elektron*, posteriormente foi dado a essas forças o nome de **forças elétricas**.

Muitos cientistas e filósofos propuseram várias teorias para explicar tais **fenômenos elétricos**. Sabe-se atualmente que eles estão intimamente ligados à estrutura da matéria.

Todos os corpos são formados de átomos. Cada átomo é constituído de partículas: os elétrons, os prótons e os nêutrons. Embora hoje existam modelos mais complexos para explicar como essas partículas se distribuem no átomo, ficaremos, para simplificar, com o modelo planetário. Segundo esse modelo, os prótons e os nêutrons estão fortemente coesos numa região central chamada **núcleo**, enquanto os elétrons giram ao seu redor (como os planetas ao redor do Sol), constituindo a **eletrosfera** (**fig. 4**). Por meio de experiências constata-se que os prótons se repelem, o mesmo acontecendo com os elétrons. Entre um próton e um elétron há atração. Para explicar essas ocorrências, estabeleceu-se que prótons e elétrons possuem uma **propriedade física** à qual se deu o nome de **carga elétrica**.

Figura 4. Modelo planetário do átomo.

* O âmbar é uma resina fóssil cuja tonalidade varia de amarelo a castanho, muito usada na confecção de objetos ornamentais.

Experiências mostram que prótons e elétrons têm comportamentos elétricos opostos. Por isso convencionou-se que há duas espécies de cargas elétricas: a **positiva** (carga elétrica do próton) e a **negativa** (carga elétrica do elétron). Os **nêutrons** não apresentam essa propriedade física, isto é, **os nêutrons não têm carga elétrica**.

Em resumo:

prótons: carga elétrica positiva
elétrons: carga elétrica negativa
nêutrons: não têm carga elétrica

No átomo, o número de prótons é igual ao número de elétrons: dizemos então que o átomo é eletricamente neutro. No núcleo, a intensa força de repulsão entre os prótons é equilibrada por uma outra força, de natureza não elétrica e não gravitacional, que mantém juntos os prótons e os nêutrons. Tal força é chamada de **força nuclear**. Por sua própria distribuição, os elétrons podem mais facilmente abandonar o átomo, ou elétrons de fora podem se agregar a ele. Com isso, o átomo pode perder sua neutralidade, adquirindo uma carga positiva (se perder elétrons) ou negativa (se receber elétrons). É essa possibilidade de elétrons se transferirem entre átomos que explica a eletrização dos corpos ao serem atritados.

Ao atritarmos o bastão de vidro com o pedaço de lã, ocorre uma transferência de elétrons entre eles, de modo que um fica com falta e o outro, com excesso de elétrons.

Os corpos que apresentam **excesso** ou **falta** de elétrons são chamados **corpos eletrizados***. Se num corpo **o número de prótons é igual ao número de elétrons**, dizemos que ele está **eletricamente neutro**. Na experiência ilustrada nas **figuras 1**, **2 e 3**, elétrons passaram do vidro para a lã. A lã, com excesso de elétrons, apresenta carga elétrica negativa. O vidro cedeu elétrons e, portanto, apresenta carga elétrica positiva. **O vidro e a lã eletrizaram-se por atrito, adquirindo cargas elétricas de sinais opostos**.

Do exposto, percebe-se que a propriedade física carga elétrica pode ser quantificada, uma vez que os corpos podem receber ou ceder um maior ou menor número de elétrons. A medida da carga elétrica que um corpo adquire recebe o nome de **quantidade de carga elétrica** e é representada por Q ou q. Frequentemente, por facilidade, fala-se simplesmente carga elétrica Q ou q, em lugar de quantidade de carga elétrica Q ou q.

Finalmente, ressaltemos que, na eletrização por atrito, além de adquirirem cargas elétricas de sinais opostos, os corpos apresentam quantidades de cargas elétricas de mesmo valor absoluto.

A série triboelétrica

As substâncias podem ser distribuídas numa sequência, de acordo com o sinal da carga que adquirem ao serem atritadas umas com as outras. Essa sequência é denominada **série triboelétrica****. Ela é organizada de tal maneira que uma dada substância adquire carga positiva se atritada com qualquer outra que a sucede na lista, e carga negativa se atritada com outra que a precede.

Exemplo de uma série triboelétrica com algumas substâncias:

..., vidro, lã, pele de ovelha, seda, algodão, ebonite***, **cobre, enxofre, ...**

Se nessa sequência considerarmos a seda, por exemplo, podemos afirmar que ela se eletriza **positivamente**, se for atritada com um bastão de ebonite, e **negativamente**, se for atritada com um bastão de vidro.

* É comum dizer que os corpos eletrizados adquirem **eletricidade estática**.

** A palavra tribo advém do grego *tribein* e significa "atritar", "esfregar". Por isso a eletrização por atrito é também denominada **triboeletrização**.

*** A ebonite é uma substância dura e negra obtida pela vulcanização de borracha com excesso de enxofre.

Seção 1.2

Princípios da Eletrostática

Objetivos

- Conhecer os princípios da Eletrostática.
- Caracterizar os materiais como condutores elétricos ou como isolantes elétricos.
- Saber o que ocorre quando se liga um condutor eletrizado à Terra.

Termos e conceitos

- dielétrico

A **Eletrostática** é a parte da Física que estuda as propriedades e a ação mútua das **cargas elétricas em repouso** em relação a um sistema inercial de referência.

Vejamos os princípios sobre os quais se fundamenta a Eletrostática.

1 Princípio da atração e repulsão

Ao aproximarmos dois bastões de vidro, ambos positivamente eletrizados, ou dois panos de lã, ambos negativamente eletrizados, constatamos repulsão (**figs. 5A e 5B**). Entre o bastão de vidro, positivo, e o pano de lã, negativo, observamos atração (**fig. 5C**). Esses fatos experimentais permitem enunciar:

> Cargas elétricas de mesmo sinal repelem-se; cargas elétricas de sinais opostos atraem-se.

Figura 5.

2 Princípio da conservação das cargas elétricas

O **princípio da conservação das cargas elétricas** pode ser assim enunciado:

> Num sistema eletricamente isolado, a soma algébrica das quantidades de cargas positivas e negativas é constante.

Consideremos, para exemplificar, dois corpos *A* e *B* eletrizados com quantidades de cargas elétricas Q_1 e Q_2, respectivamente (**fig. 6**). Admitamos que, de um modo conveniente, houve uma troca de cargas entre os corpos, e sejam, respectivamente, Q'_1 e Q'_2 as novas quantidades de cargas de *A* e *B*.

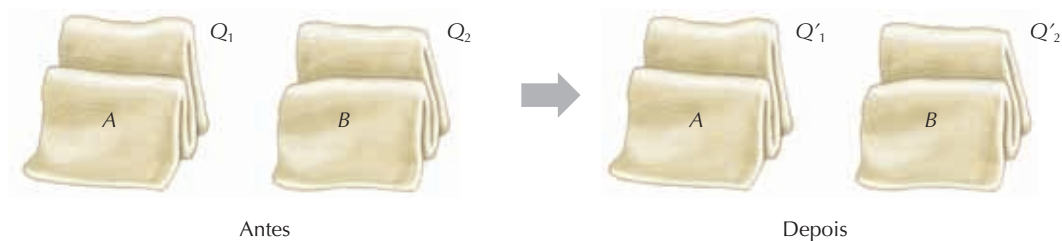



Figura 6. **Os corpos *A* e *B* estão eletrizados com quantidades de cargas Q_1 e Q_2. Após a troca de cargas entre os corpos, as novas quantidades de cargas serão Q'_1 e Q'_2.**

De acordo com o princípio da conservação das cargas elétricas, a quantidade de carga elétrica total antes da troca é igual à quantidade de carga elétrica total depois da troca, isto é:

$$Q_1 + Q_2 = Q'_1 + Q'_2$$

Essa igualdade só é válida se o sistema for **eletricamente isolado**, isto é, se o **sistema não troca cargas elétricas com o meio exterior**.

3 Condutores e isolantes

Segurando um bastão de vidro por uma das extremidades e atritando a outra com um pano de lã, **somente a extremidade atritada se eletriza** (**fig. 7**). Isso significa que as cargas elétricas em excesso localizam-se em determinada região e não se espalham pelo bastão.

Figura 7. **No bastão de vidro, as cargas em excesso localizam-se na região atritada.**

Repetindo essa experiência com um bastão metálico, segurando-o por meio de um cabo de vidro, o bastão se eletriza e as cargas em excesso espalham-se por toda a sua superfície (**fig. 8**).

Figura 8. **No bastão metálico, as cargas em excesso distribuem-se por toda a sua superfície.**

Os materiais, como o vidro, que **conservam as cargas nas regiões onde elas surgem**, são chamados **isolantes** ou **dielétricos**. Os materiais nos quais as **cargas se espalham** imediatamente são chamados **condutores**. É o caso dos metais. Nos condutores metálicos, os elétrons mais afastados do núcleo estão fracamente ligados a ele e, quando sujeitos a uma força, mesmo de pequena intensidade, abandonam o átomo e movem-se pelos espaços interatômicos. Esses são os **elétrons livres**, responsáveis pela condução de eletricidade nos metais. Os isolantes não apresentam elétrons livres, pois todos os elétrons estão fortemente ligados aos respectivos núcleos.

Na prática, não existem condutores e isolantes perfeitos, e sim bons condutores, como os metais e a grafite, e bons isolantes, como a mica e a ebonite.

O corpo humano e a Terra também são condutores. Por isso, ao atritarmos o bastão metálico segurando-o diretamente com a mão, as cargas elétricas em excesso espalham-se pelo metal, pelo corpo humano e pela Terra. Isso significa que praticamente o bastão metálico não se eletriza em virtude de suas dimensões serem reduzidas em relação às dimensões da Terra. Desse fato concluímos:

Ao se ligar um condutor eletrizado à Terra, ele perde sua eletrização.

Quando um condutor isolado está positivamente eletrizado, elétrons sobem da Terra para ele, neutralizando seu excesso de cargas positivas (**fig. 9**). Quando um condutor está negativamente eletrizado, seus elétrons em excesso escoam para a Terra (**fig. 10**). Embora o movimento seja sempre dos elétrons, costuma-se dizer que o **condutor se descarrega** ao perder sua eletrização, esteja ele positiva ou negativamente eletrizado antes de ser aterrado.

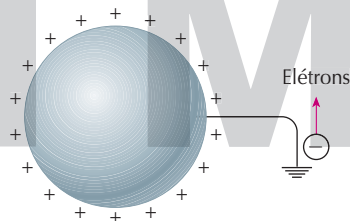



Figura 9. Condutor positivamente eletrizado: ao ser ligado à Terra, perde sua eletrização (descarrega-se) em virtude da subida de elétrons provenientes da Terra.

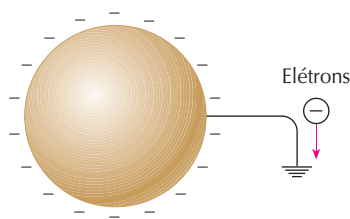



Figura 10. Condutor negativamente eletrizado: ao ser ligado à Terra, perde sua eletrização (descarrega-se) em virtude do escoamento de elétrons para a Terra.

Observação

Nos condutores metálicos, as cargas elétricas em excesso distribuem-se sempre na superfície externa, quaisquer que sejam suas dimensões. Isso acontece porque, sendo cargas de mesmo sinal, elas repelem-se mutuamente de modo a manter a maior distância possível entre si.

Seção 1.3

Outras formas de eletrização

Objetivos

- Compreender o processo de eletrização por contato.
- Compreender o processo de eletrização por indução.
- Analisar o funcionamento do gerador eletrostático de Van de Graaf.
- Verificar se um corpo está ou não eletrizado utilizando um eletroscópio.

Termos e conceitos

- pêndulo elétrico
- eletroscópio de folhas

1 Eletrização por contato

Colocando-se em contato dois condutores *A* e *B*, um eletrizado (*A*) e outro neutro (*B*), *B* se eletriza com carga de mesmo sinal que *A*.

De fato, se *A* está positivamente eletrizado, ao entrar em contato com *B* atrai parte dos elétrons livres de *B*. Assim, *A* continua positivamente eletrizado, mas com uma carga menor, e *B*, que estava neutro, fica positivamente eletrizado (**fig. 11**).

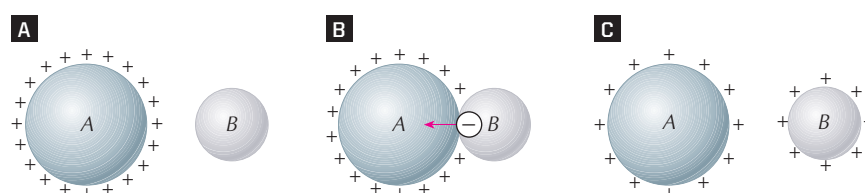



Figura 11. (A) *A* positivo e *B* neutro estão isolados e afastados; (B) colocados em contato, durante breve intervalo de tempo, elétrons livres vão de *B* para *A*; (C) após o processo, *A* e *B* apresentam-se eletrizados positivamente.

Estando *A* negativamente eletrizado, seus elétrons em excesso estão distribuídos em sua superfície externa. Ao entrar em contato com *B*, esses elétrons em excesso espalham-se pela superfície externa do conjunto. Assim, *A* continua negativo, mas com um menor número de elétrons em excesso, e *B*, que estava neutro, eletriza-se negativamente (**fig. 12**).

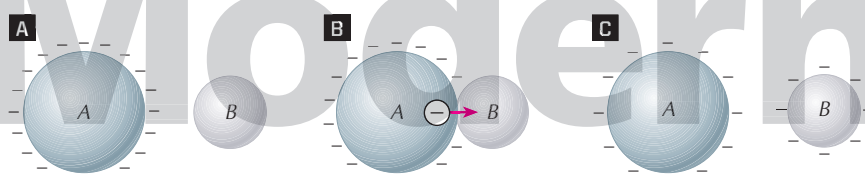



Figura 12. (A) *A* negativo e *B* neutro estão isolados e afastados; (B) colocados em contato, durante breve intervalo de tempo, elétrons vão de *A* para *B*; (C) após o processo, *A* e *B* apresentam-se eletrizados negativamente.

Se *B* for isolante, a carga não se espalha por sua superfície, conservando-se na região do contato.

Considerando-se *A* e *B* como **condutores de mesma forma e de mesmas dimensões**, como por exemplo duas esferas condutoras de mesmo raio, após o contato eles terão cargas iguais (**fig. 13**).

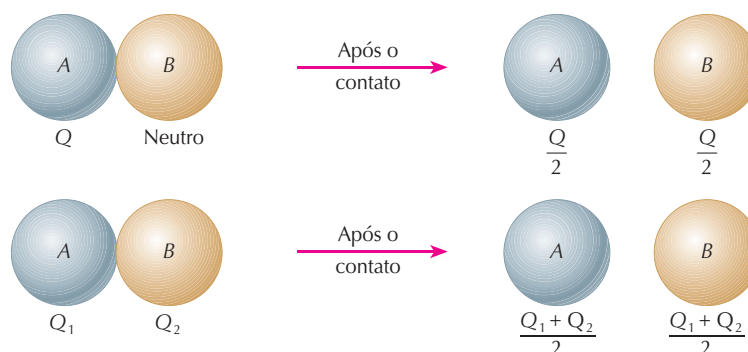



Figura 13. Eletrização por contato entre esferas condutoras de mesmo raio.

Conteúdo digital Moderna PLUS http://www.modernaplus.com.br
A Física em nosso Mundo: *A eletricidade estática no dia a dia*

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

R. 1 Atrita-se uma placa de vidro com um pano de lã, inicialmente neutros, e faz-se a lã entrar em contato com uma bolinha de cortiça, também inicialmente neutra, suspensa por um fio isolante. Se aproximarmos a placa da bolinha, constataremos atração ou repulsão? Justifique.

Solução:
Atritando-se a placa de vidro com o pano de lã, ambos eletrizam-se com cargas de mesmo valor absoluto e sinais contrários. O vidro se eletriza positivamente e a lã, negativamente (**fig. I**):

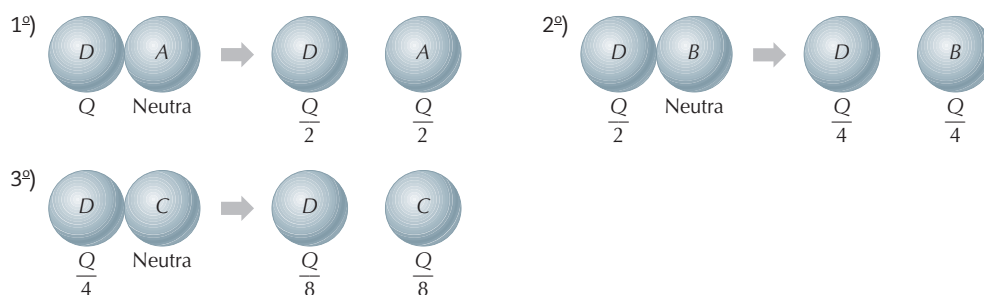
Figura I.

Por contato, a bolinha de cortiça eletriza-se com a carga de mesmo sinal que a lã (**fig. II**):

Figura II.

Ao aproximarmos a placa de vidro da bolinha, há atração, pois a placa está eletrizada positivamente e a bolinha, negativamente.

R. 2 Dispõe-se de quatro esferas metálicas iguais e isoladas umas das outras. Três delas (*A*, *B* e *C*) estão neutras e a quarta (*D*) está eletrizada com a carga Q. Coloca-se *D* em contato sucessivamente com *A*, *B* e *C*. Qual a carga final de *D*?

Solução:
Como as esferas metálicas são iguais, após cada contato as cargas serão iguais:

Resposta: A carga final de *D* é $\frac{Q}{8}$.

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

P. 1 Têm-se uma barra de vidro, um pano de lã e duas bolinhas de cortiça, todos inicialmente neutros. Atrita-se a barra de vidro com o pano de lã. A seguir, faz-se a barra de vidro entrar em contato com uma das bolinhas de cortiça e o pano de lã com a outra. Aproximando-se as bolinhas de cortiça constata-se atração. Justifique.

P. 2 Dispõe-se de três esferas metálicas idênticas e isoladas umas das outras. Duas delas (*A* e *B*) estão eletrizadas com cargas iguais a Q e a terceira (*C*) está neutra. Coloca-se em contato *C* com *A* e, a seguir, *C* com *B*. Determine, nessas condições, a carga elétrica final de *C*.

V3_P1_UN_A_CAP_01a.indd 22 17.09.09 17:16:30

2 Eletrização por indução

Seja um condutor *B*, inicialmente neutro (**fig. 14**). Aproxima-se dele, sem tocá-lo, um corpo *A*, positivamente eletrizado. Alguns elétrons livres de *B* são atraídos por *A* e se acumulam na região de *B* mais próxima de *A*. A região de *B* mais afastada de *A* fica com falta de elétrons e, portanto, com excesso de cargas positivas (**fig. 15**). Esse fenômeno de separação de cargas em um condutor pela simples presença de outro corpo eletrizado é denominado **indução eletrostática**. O corpo eletrizado *A* é o **indutor**, e o condutor *B*, que sofreu o processo de separação das cargas, é o **induzido**.

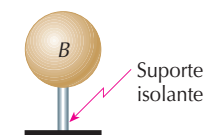



Figura 14. *B*: condutor inicialmente neutro.

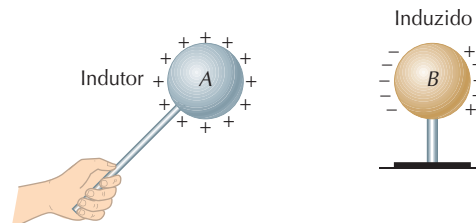



Figura 15. A região de *B* mais afastada de *A* fica com falta de elétrons.

Afastando-se o indutor, o induzido volta à situação inicial. Para que *B* fique eletrizado, deve--se, após aproximar *A* de *B*, realizar a seguinte sequência de operações:

1ª) **Na presença do indutor liga-se o induzido à Terra** (basta encostar o dedo no induzido, **figura 16**). Ligando-se o induzido à Terra, elétrons escoam da Terra para o induzido, neutralizando a carga positiva induzida de *B*. Portanto, com a ligação à Terra, neutralizam-se as cargas do induzido que têm o mesmo sinal da carga do indutor.

2ª) **Na presença do indutor, desfaz-se a ligação do induzido com a Terra** (**fig. 17**).

3ª) **Afasta-se o indutor**. Os elétrons em excesso no induzido espalham-se imediatamente por ele. Assim, *B* **eletriza-se negativamente** (**fig. 18**).

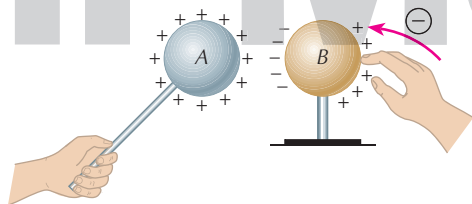
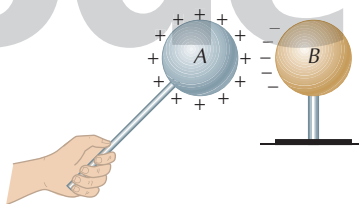
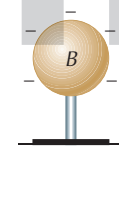



Figura 16. Figura 17. Figura 18.

Esse é o processo de **eletrização por indução**.

A **figura 19** mostra as operações realizadas considerando-se o indutor negativo. Note que, ao ser efetuada a ligação do induzido com a Terra, os elétrons que constituem as cargas do induzido de mesmo sinal que a carga do indutor escoam para a Terra. No final do processo, *B* encontra-se **positivamente eletrizado**.

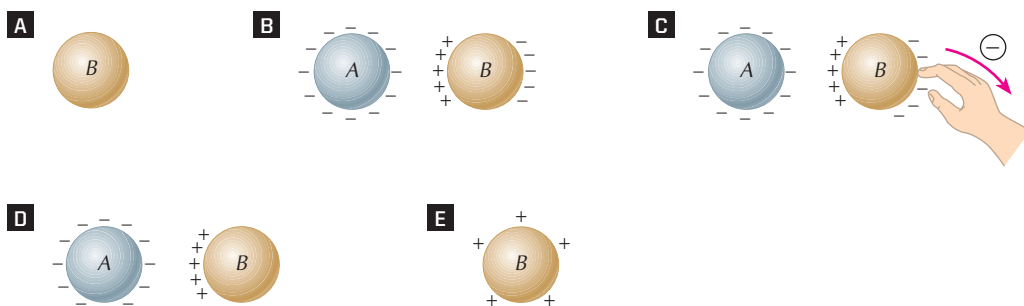



Figura 19. (A) Condutor *B*, neutro e isolado; (B) aproximando *A* de *B*, ocorre indução eletrostática; (C) ligando *B* à Terra, elétrons de *B* escoam para a Terra; (D) a ligação de *B* com a Terra é desfeita; (E) o indutor *A* é afastado e *B* eletriza-se positivamente.

Dos casos analisados, podemos concluir:

Na eletrização por indução, o induzido eletriza-se com carga de sinal contrário à do indutor. A carga do indutor não se altera.

Com base no fenômeno da indução eletrostática podemos explicar também por que, ao aproximarmos um corpo eletrizado de um condutor neutro, ocorre atração.

Seja um condutor metálico *B* neutro suspenso por um fio isolante (**fig. 20**); aproxima-se dele, sem tocá-lo, um corpo *A* positivamente eletrizado (**fig. 21**). O indutor *A* atrai cargas negativas do induzido *B*, repelindo as cargas positivas. Como a carga positiva do indutor está mais próxima da carga negativa do induzido, a força de atração tem intensidade maior que a de repulsão e o efeito resultante é de atração.

Figura 20. Condutor metálico *B* neutro e isolado.

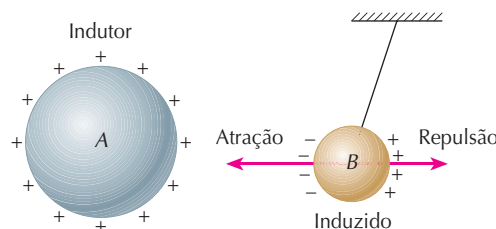



Figura 21. As cargas positivas de *A* atraem as negativas de *B* e repelem as positivas de *B*. A força de atração tem intensidade maior que a de repulsão.

Portanto:

Quando entre um corpo eletrizado *A* e um condutor *B* ocorre atração, *B* pode estar eletrizado com carga de sinal oposto ao de *A* ou pode estar neutro.

Uma pequena esfera neutra de isopor* é atraída quando aproximada da esfera metálica eletrizada de um gerador eletrostático.

O filete de água* desvia-se da vertical ao ser atraído por um pente plástico previamente eletrizado por atrito com um pedaço de flanela eletrostático.

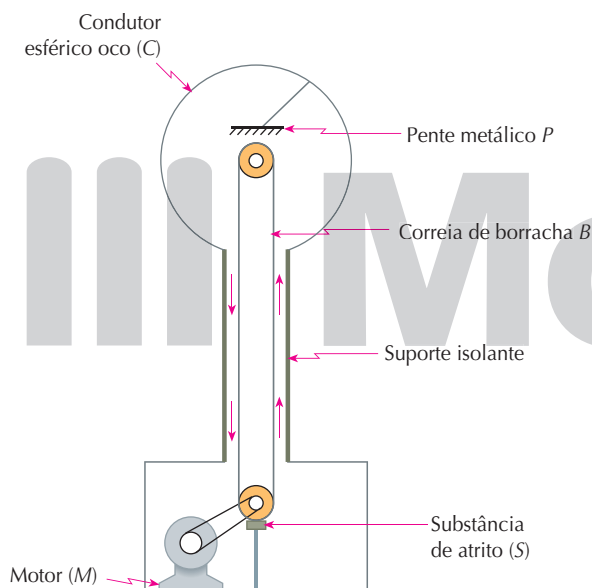
* Os isolantes, quando próximos a corpos eletrizados, sofrem um processo semelhante à indução eletrostática denominado **polarização do dielétrico** (isolante). Há separação de cargas elétricas, embora os isolantes não possuam elétrons livres (veja a seção 12.5, item 1).

Gerador eletrostático de Van de Graaf

O gerador eletrostático de Van de Graaf*, apresentado de modo extremamente simplificado no esquema abaixo, consiste basicamente num condutor esférico metálico e oco *C*, no qual se acumulam cargas elétricas em sua superfície externa. Esse condutor é sustentado por suportes isolantes, de modo que mantenha a carga elétrica que armazena.

O gerador se eletriza da seguinte maneira: uma correia de borracha *B*, acionada por um motor *M*, durante seu movimento entre duas polias, atrita-se com uma substância *S*, colocada na parte inferior do dispositivo. Em consequência, a correia eletriza-se com carga de determinado sinal (que vamos supor positivo). Na parte superior, essa carga produz indução em um condutor metálico em forma de pente *P*, de modo que, nas pontas, acumulam-se cargas negativas, e as cargas positivas induzidas ocupam a superfície externa do condutor *C*. As cargas negativas induzidas nas pontas escoam e a correia desce neutra.

Conforme a natureza da substância *S* com que a borracha se atrita, podemos ter um gerador que armazena carga positiva ou um gerador que armazena carga negativa.

Geradores de Van de Graaf de grande porte, que armazenam grandes quantidades de carga elétrica, gerando descargas elétricas de enormes proporções, costumam ser utilizados em aceleradores de partículas.

As tiras de papel são repelidas pela esfera do gerador de Van de Graaf, pois adquirem cargas de mesmo sinal que as do aparelho.

3 Eletroscópios

Os aparelhos destinados a verificar se um corpo está ou não eletrizado são chamados **eletroscópios**. Um deles é o **pêndulo elétrico** (**fig. 22**), constituído por uma esfera de material leve (isopor ou cortiça), recoberta por delgada camada metálica, e suspensa por um fio isolante (seda ou náilon) em uma haste-suporte.

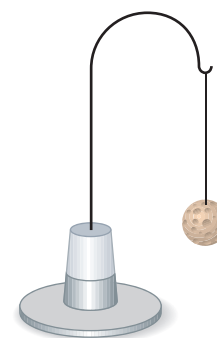



Figura 22. **Pêndulo elétrico.**

* **VAN DE GRAAF**, Robert Jemison (1901-1967), físico e engenheiro norte-americano.

Para determinar se um corpo *A* está ou não eletrizado, com o auxílio do pêndulo elétrico, devemos aproximá-lo de sua esfera. Se esta não se mover, o corpo *A* está neutro (**fig. 23A**). Se for atraída, o corpo *A* está eletrizado (**fig. 23B**).

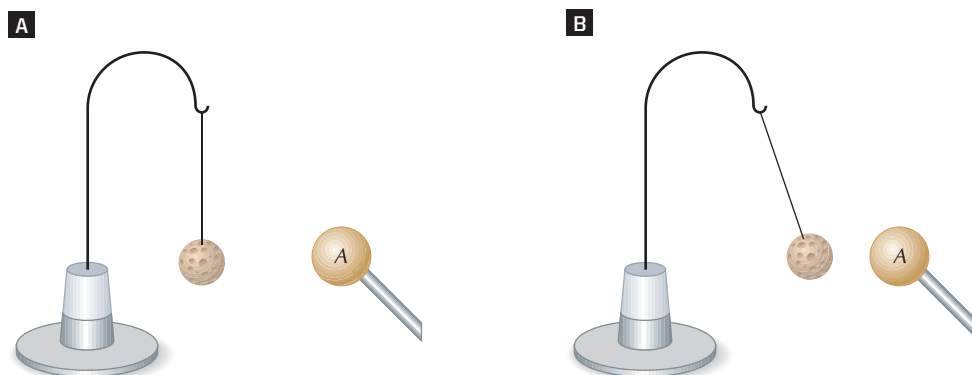



Figura 23.

Como determinar o sinal da carga elétrica do corpo *A*? O corpo *A* eletrizado atrai a esfera do pêndulo, estabelecendo-se entre eles um contato (**fig. 24A**). A esfera se eletriza com carga de mesmo sinal que *A* e, em seguida, é repelida (**fig. 24B**).

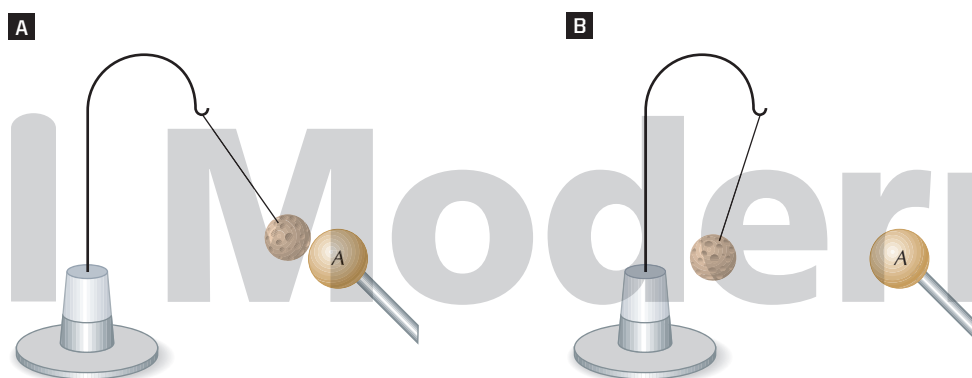



Figura 24.

Depois, afasta-se *A* e aproxima-se da esfera um corpo *B*, cuja carga tem sinal conhecido. Se *B* repelir a esfera (**fig. 25A**), *A* tem mesmo sinal que *B*; se *B* atrair a esfera (**fig. 25B**), *A* tem sinal contrário ao de *B*.

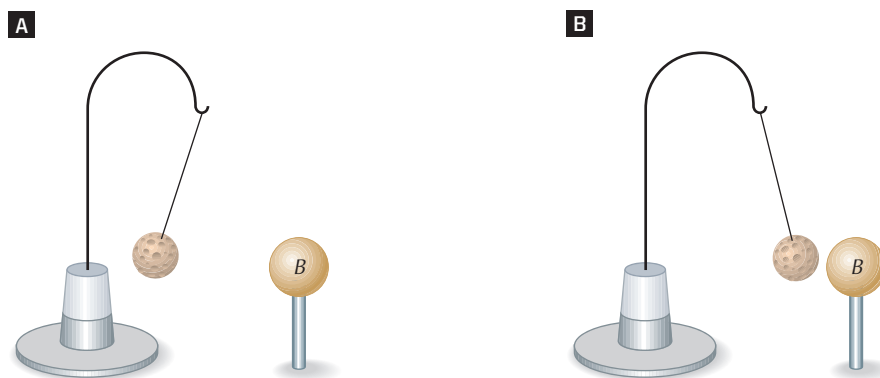



Figura 25.

Conteúdo digital Moderna PLUS http://www.modernaplus.com.br
Atividade experimental: *Eletroscópio de folhas*

Outro aparelho com o qual podemos verificar se um corpo está ou não eletrizado é o **eletroscópio de folhas** (fig. 26). Ele é constituído de duas lâminas metálicas delgadas, ligadas por uma haste condutora a uma esfera metálica.

Para determinar se o corpo *A* da **figura 27** está ou não eletrizado, aproximamos *A* da esfera do eletroscópio. Se as lâminas se abrirem, isso significa que *A* está eletrizado.

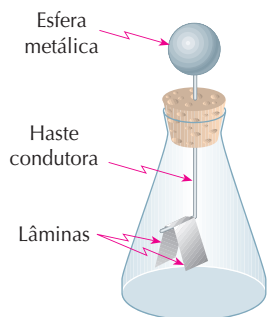



Figura 26. **Eletroscópio de folhas.**

Figura 27. **Se *A* estiver eletrizado, ocorre indução e as lâminas se abrem.**

As folhas metálicas do eletroscópio permanecem encostadas enquanto não eletrizadas.

Quando o bastão eletrizado por atrito com uma flanela é aproximado da esfera do eletroscópio, as folhas metálicas se abrem. Elas se repelem porque adquirem (por indução) cargas de mesmo sinal que o bastão.

Entre na rede No endereço eletrônico http://www.glenbrook.k12.il.us/gbssci/phys/mmedia/index.html, em Static Electricity (acesso em julho/2009), você pode encontrar animações e textos sobre indução eletrostática e eletroscópios.

EXERCÍCIO RESOLVIDO

R. 3 Considere um eletroscópio de folhas descarregado. São realizadas as seguintes operações:

a) Aproxima-se de sua esfera um corpo negativamente eletrizado.

b) Liga-se o eletroscópio à Terra.

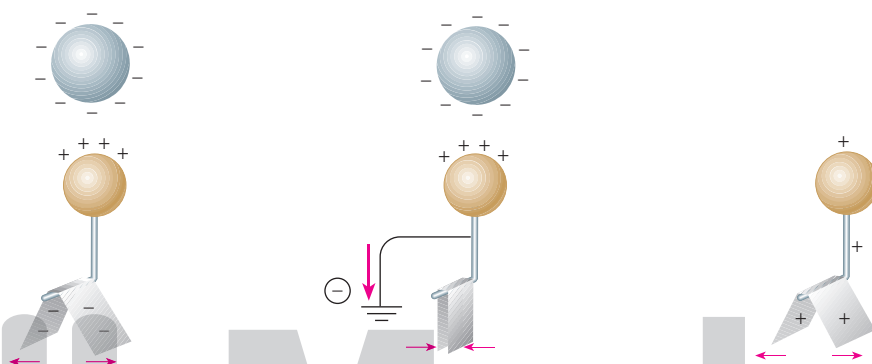
c) Desfaz-se a ligação com a Terra e, a seguir, afasta-se o corpo eletrizado.

Indique o que acontece em cada operação e determine o sinal da carga do eletroscópio após essas operações.

Solução:

a) Ao aproximarmos da esfera do eletroscópio um corpo eletrizado negativamente, o eletroscópio sofre indução eletrostática e as lâminas se abrem.

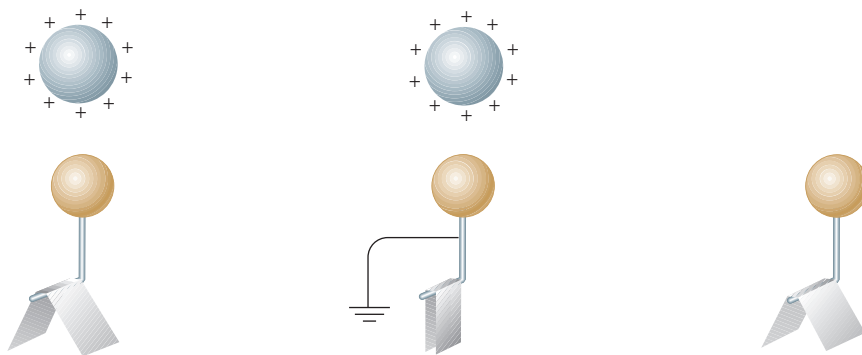
b) Ligando-se o eletroscópio à Terra, as lâminas se fecham, pois os elétrons escoam para a Terra.

c) Desfazendo-se a ligação com a Terra e afastando-se o corpo eletrizado, o eletroscópio se eletriza positivamente. Observe que, novamente, as lâminas se abrem.

EXERCÍCIO PROPOSTO

P. 3 Considere um eletroscópio de folhas descarregado. São realizadas as seguintes operações:

a) Aproxima-se da esfera do eletroscópio um corpo positivamente eletrizado.

b) Liga-se o eletroscópio à Terra.

c) Desfaz-se a ligação com a Terra e, a seguir, afasta-se o corpo eletrizado.

Indique o que acontece em cada operação e determine o sinal da carga do eletroscópio após essas operações.

Conteúdo digital Moderna PLUS http://www.modernaplus.com.br
Atividades experimentais: *Pêndulo elétrico; Eletrização por atrito e indução eletrostática*

Seção 1.4

Forças entre cargas elétricas puntiformes: lei de Coulomb

Objetivo

Conhecer a lei de Coulomb.

Termos e conceitos

- constante eletrostática
- balança de torção
- carga elementar
- carga elétrica quantizada

Define-se **carga elétrica puntiforme** como sendo o corpo eletrizado cujas dimensões podem ser desprezadas em relação às distâncias que o separam de outros corpos eletrizados.

Considere duas cargas elétricas puntiformes Q_1 e Q_2 separadas pela distância d e situadas no vácuo (**fig. 28**). Entre elas ocorre **atração** (**fig. 28A**), se tiverem sinais opostos, ou **repulsão** (**fig. 28B**), se tiverem mesmo sinal, com forças de mesma intensidade, mesma direção e sentidos opostos, de acordo com o princípio da ação e reação.

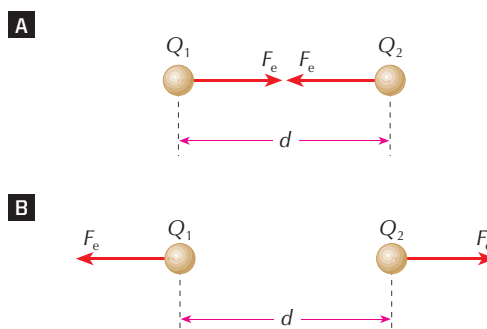



Figura 28.

A **intensidade** da força de ação mútua entre as cargas, supostas no vácuo, **depende da distância** d **entre as cargas e dos valores das cargas** Q_1 **e** Q_2.

A influência desses fatores foi determinada experimentalmente por Charles Coulomb*, que estabeleceu o seguinte enunciado, conhecido como **lei de Coulomb**:

> A intensidade da força de ação mútua entre duas cargas elétricas puntiformes é diretamente proporcional ao produto dos valores absolutos das cargas e inversamente proporcional ao quadrado da distância que as separa.

A partir do enunciado podemos escrever:

$$F_e = k_0 \cdot \frac{|Q_1| \cdot |Q_2|}{d^2}$$

Nessa fórmula, Q_1 e Q_2 são tomadas em valor absoluto; seus sinais apenas indicam se a força é de atração ou de repulsão.

* **COULOMB**, Charles Augustin de (1736-1806), físico francês, trabalhou como engenheiro militar até os 40 anos nas colônias de seu país no Caribe. Por razões de saúde, voltou à Europa, passando a dedicar-se à pesquisa científica. Inventou a balança de torção, com a qual verificou a lei experimental que rege a ação entre cargas elétricas. Em sua homenagem, deu-se no SI o nome de coulomb (C) à unidade de carga elétrica.

No Sistema Internacional de Unidades (SI), a unidade de carga elétrica é o **coulomb**, cujo símbolo é **C**.

A constante de proporcionalidade depende do meio onde estão as cargas e do sistema de unidades adotado. No caso do vácuo, é indicada por k_0 e denominada **constante eletrostática do vácuo** ou simplesmente **constante eletrostática**.

Da fórmula da lei de Coulomb, podemos determinar a unidade da constante k_0 no SI:

$$F_e = k_0 \cdot \frac{|Q_1| \cdot |Q_2|}{d^2} \Rightarrow k_0 = \frac{F_e \cdot d^2}{|Q_1| \cdot |Q_2|}$$

Daí, vem: $\dfrac{\text{newton} \times (\text{metro})^2}{(\text{coulomb})^2} = \dfrac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}$

Experimentalmente, obtém-se para a constante eletrostática do vácuo k_0 o valor:

$$k_0 = 9 \cdot 10^9 \, \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}$$

Fixando-se os valores de Q_1 e Q_2 e variando-se a distância d, a intensidade F_e da força elétrica varia. Observe que, dobrando-se a distância, a intensidade da força elétrica fica quatro vezes menor; triplicando-se a distância, a intensidade da força elétrica fica nove vezes menor, e assim por diante. O quadro a seguir apresenta esses valores.

d	$2d$	$3d$	$4d$	$5d$
F_e	$\frac{F_e}{4}$	$\frac{F_e}{9}$	$\frac{F_e}{16}$	$\frac{F_e}{25}$

Colocando-se a intensidade da força elétrica no eixo das ordenadas e a distância no eixo das abscissas, obtemos o gráfico de F_e em função de d (**fig. 29**).

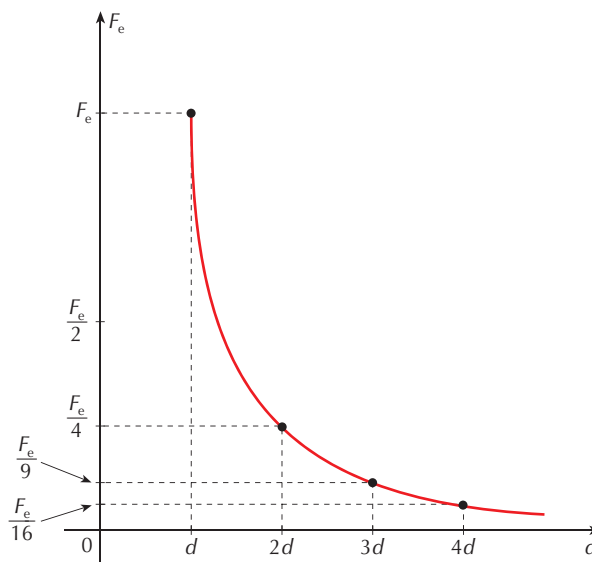



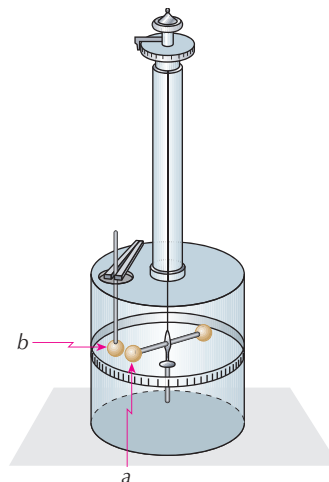
Figura 29. Gráfico de $F_e \times d$.

Conteúdo digital Moderna PLUS http://www.modernaplus.com.br
História da Física: *Do âmbar à pilha voltaica*

A experiência de Coulomb

Para estabelecer a lei de interação entre cargas elétricas, Coulomb usou uma balança de torção, esquematizada na figura. Nessa balança, uma barra isolante homogênea tem, em suas extremidades, duas pequenas esferas de mesmo peso, inicialmente neutras. A barra é suspensa pelo seu ponto médio por um delgado fio de prata, cuja torção pode ser avaliada num mostrador situado na parte superior do aparelho.

Durante a operação, outra barra isolante, em cuja extremidade há uma pequena esfera *b* eletrizada, é introduzida verticalmente por um orifício do dispositivo (ver figura), de modo que toque uma das esferas (*a*) da primeira barra. A esfera *a* eletriza-se com carga de mesmo sinal que *b*, ocorrendo a repulsão entre elas. Em consequência dessa repulsão, há uma torção no fio de suspensão. A intensidade da força elétrica é proporcional ao ângulo de torção.

Medindo o ângulo de torção para diferentes distâncias entre *a* e *b*, Coulomb estabeleceu a lei do inverso do quadrado da distância. Mantendo a distância e mudando convenientemente o valor das cargas, ele estabeleceu que a intensidade da força elétrica é diretamente proporcional ao produto das cargas.

Esquema da balança de torção apresentada por Coulomb, em 1785, à Academia Francesa de Ciências.

Conteúdo digital Moderna PLUS http://www.modernaplus.com.br
Animação: *Experimento de Coulomb*

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

R. 4 Determine a intensidade da força de repulsão entre duas cargas elétricas iguais a 1 C, situadas no vácuo e a 1 m de distância. É dada a constante eletrostática: $k_0 = 9 \cdot 10^9 \dfrac{N \cdot m^2}{C^2}$

Solução:

Pela lei de Coulomb: $F_e = k_0 \cdot \dfrac{|Q_1| \cdot |Q_2|}{d^2}$

Sendo $Q_1 = Q_2 = 1$ C; $d = 1$ m; $k_0 = 9 \cdot 10^9 \dfrac{N \cdot m^2}{C^2}$, temos: $F_e = 9 \cdot 10^9 \cdot \dfrac{1 \cdot 1}{1^2} \Rightarrow \boxed{F_e = 9 \cdot 10^9 \text{ N}}$

Resposta: $9 \cdot 10^9$ N

Observações:

- Uma força de intensidade $9 \cdot 10^9$ N, entre duas cargas elétricas de 1 C, corresponde aproximadamente ao peso de um corpo de massa igual a 1 milhão de toneladas. Em virtude disso, são muito utilizados os submúltiplos do coulomb:

  1 milicoulomb = 1 mC = 10^{-3} C 1 nanocoulomb = 1 nC = 10^{-9} C
  1 microcoulomb = 1 μC = 10^{-6} C 1 picocoulomb = 1 pC = 10^{-12} C

- A menor carga elétrica livre encontrada na natureza é a carga de um elétron ou de um próton. Essas cargas são iguais em valor absoluto, constituindo a chamada **carga elementar** (*e*):

$$\boxed{e = 1{,}6 \cdot 10^{-19} \text{ C}}$$

- Sendo *n* o número de elétrons em excesso de um corpo eletrizado negativamente, sua carga elétrica, em módulo, vale:

$$\boxed{Q = ne} \text{ em que } e \text{ é a carga elementar}$$

Usamos a mesma expressão para calcular a carga elétrica de um corpo positivamente eletrizado, sendo *n* o número de prótons em excesso (ou de elétrons em falta) no corpo.
Note que a carga elétrica de um corpo não existe em quantidades contínuas, mas sim múltiplas da carga elementar. Isso significa que a carga elétrica de um corpo é **quantizada**, isto é, ela é sempre um múltiplo inteiro da carga elétrica elementar.

R. 5 Um corpo inicialmente neutro é eletrizado com carga Q = 32 μC. Qual o número de elétrons retirados do corpo?

Solução:

Sendo *n* o número de elétrons retirados do corpo e *e* a carga elementar, temos:

$$Q = ne \Rightarrow 32 \cdot 10^{-6} = n \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19} \Rightarrow \boxed{n = 2 \cdot 10^{14} \text{ elétron}}$$

Resposta: Foram retirados $2 \cdot 10^{14}$ elétrons do corpo.

R. 6 A distância entre o elétron e o próton no átomo de hidrogênio é da ordem de $5{,}3 \cdot 10^{-11}$ m.

a) Determine a intensidade da força de atração gravitacional.

b) Determine a intensidade da força de atração eletrostática entre as partículas.

c) Compare os valores obtidos.

Considere como dados:

massa do próton: $1{,}7 \cdot 10^{-27}$ kg

massa do elétron: $9{,}1 \cdot 10^{-31}$ kg

constante de gravitação universal: $G = 6{,}67 \cdot 10^{-11} \dfrac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{kg}^2}$

carga elétrica do elétron: $-1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C

carga elétrica do próton: $+1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C

constante eletrostática do vácuo: $k_0 = 9 \cdot 10^9 \dfrac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}$

Solução:

a) A lei de Newton nos fornece a intensidade da força de atração gravitacional:

$$F_G = G \cdot \frac{m_1 m_2}{d^2} \Rightarrow F_G = 6{,}67 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{1{,}7 \cdot 10^{-27} \cdot 9{,}1 \cdot 10^{-31}}{(5{,}3 \cdot 10^{-11})^2} \Rightarrow \boxed{F_G \simeq 3{,}7 \cdot 10^{-47} \text{ N}}$$

b) A lei de Coulomb nos fornece a intensidade da força de atração eletrostática:

$$F_e = k_0 \cdot \frac{|Q_1| \cdot |Q_2|}{d^2} \Rightarrow F_e = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{1{,}6 \cdot 10^{-19} \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}}{(5{,}3 \cdot 10^{-11})^2} \Rightarrow \boxed{F_e \simeq 8{,}2 \cdot 10^{-8} \text{ N}}$$

c) $$\frac{F_e}{F_G} \simeq \frac{8{,}2 \cdot 10^{-8}}{3{,}7 \cdot 10^{-47}} \Rightarrow \frac{F_e}{F_G} \simeq 2{,}2 \cdot 10^{39} \Rightarrow \boxed{F_e \simeq 2{,}2 \cdot 10^{39} \cdot F_G}$$

Resposta: a) $F_G \simeq 3{,}7 \cdot 10^{-47}$ N; b) $F_e \simeq 8{,}2 \cdot 10^{-8}$ N; c) A intensidade da força elétrica F_e é da ordem de 10^{39} vezes maior que a intensidade da força de atração gravitacional F_G.

R. 7 Duas cargas elétricas puntiformes positivas e iguais a Q estão situadas no vácuo a 2 m de distância. Sabe-se que a força de repulsão mútua tem intensidade de 0,1 N. Calcule Q.

$\left(\text{Dado: } k_0 = 9 \cdot 10^9 \dfrac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}\right)$

Solução:

Pela lei de Coulomb: $F_e = k_0 \cdot \dfrac{|Q_1| \cdot |Q_2|}{d^2}$

Sendo $F_e = 0{,}1$ N; $d = 2$ m; $k_0 = 9 \cdot 10^9 \dfrac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}$ e $Q_1 = Q_2 = Q$, temos:

$$0{,}1 = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{Q \cdot Q}{2^2} \Rightarrow Q^2 = \frac{4}{9} \cdot 10^{-10} \Rightarrow \boxed{Q = \frac{2}{3} \cdot 10^{-5} \text{ C}}$$

Resposta: $\dfrac{2}{3} \cdot 10^{-5}$ C

R. 8 Duas pequenas esferas idênticas, positivamente eletrizadas com carga Q e 3Q, são colocadas a uma distância *d*, no vácuo, originando-se entre elas uma força de intensidade F_e. Em seguida, as esferas são postas em contato e afastadas a uma distância 2*d*. Determine, em função de F_e, a nova intensidade da força elétrica de repulsão.

Solução:

Antes do contato, a lei de Coulomb nos fornece: $F_e = k_0 \cdot \dfrac{Q \cdot 3Q}{d^2}$

Após o contato, as cargas tornam-se iguais a: $\dfrac{Q + 3Q}{2} = 2Q$

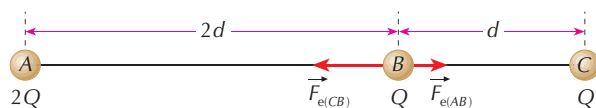
Assim, a intensidade da força elétrica de repulsão passa a ser: $F'_e = k_0 \cdot \frac{2Q \cdot 2Q}{(2d)^2} \Rightarrow F'_e = k_0 \cdot \frac{Q \cdot Q}{d^2}$

Comparando-se F'_e com F_e resulta: $\boxed{F'_e = \frac{F_e}{3}}$

Resposta: $F'_e = \frac{F_e}{3}$

R. 9 Três pequenas esferas A, B e C com cargas elétricas respectivamente iguais a 2Q, Q e Q estão localizadas como mostra a figura:

A intensidade da força elétrica exercida por C sobre B é de $8 \cdot 10^{-2}$ N. Qual a intensidade da força elétrica resultante que A e C exercem sobre B?

Solução:
Na figura representamos as forças elétricas que A e C exercem em B.

A força elétrica que C exerce em B tem intensidade:

$$F_{e(CB)} = k_0 \cdot \frac{|Q| \cdot |Q|}{d^2}$$

A força elétrica que A exerce em B tem intensidade:

$$F_{e(AB)} = k_0 \cdot \frac{|2Q| \cdot |Q|}{(2d)^2} \Rightarrow F_{e(AB)} = \frac{1}{2} \cdot k_0 \cdot \frac{|Q| \cdot |Q|}{d^2}$$

Comparando $F_{e(AB)}$ com $F_{e(CB)}$ resulta: $F_{e(AB)} = \frac{F_{e(CB)}}{2}$

Como $F_{e(CB)} = 8 \cdot 10^{-2}$ N, temos que $F_{e(AB)} = 4 \cdot 10^{-2}$ N.

As forças $\vec{F}_{e(AB)}$ e $\vec{F}_{e(CB)}$ têm mesma direção e sentidos opostos.

Portanto, a intensidade da força elétrica resultante na esfera B é dada por:

$$F_e = F_{e(CB)} - F_{e(AB)} \Rightarrow F_e = 8 \cdot 10^{-2} - 4 \cdot 10^{-2} \Rightarrow \boxed{F_e = 4 \cdot 10^{-2}\ \text{N}}$$

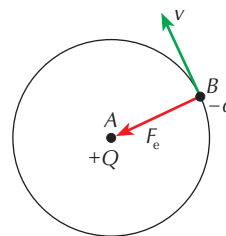
Resposta: $4 \cdot 10^{-2}$ N

R. 10 Considere dois pontos materiais A e B no vácuo, afastados de qualquer outro corpo. O ponto A é fixo e possui carga elétrica positiva $+Q$. O ponto B executa movimento circular com centro A e raio r; ele tem massa m e carga elétrica negativa $-q$. Desprezando as ações gravitacionais, determine a velocidade de B. A constante eletrostática é k_0.

Solução:
A força elétrica, em cada instante, tem mesmo módulo e está voltada para o centro da trajetória. Isso significa que ela é uma força centrípeta. Desse modo, o movimento circular que B realiza é **uniforme**.

Sendo $F_e = k_0 \cdot \frac{Qq}{r^2}$ e $F_{cp} = ma_{cp} = \frac{mv^2}{r}$, em que a_{cp} é a aceleração centrípeta e v a velocidade, vem:

$$F_e = F_{cp} \Rightarrow k_0 \cdot \frac{Qq}{r^2} = \frac{mv^2}{r} \Rightarrow \boxed{v = \sqrt{k_0 \cdot \frac{Qq}{mr}}}$$

Resposta: $v = \sqrt{k_0 \cdot \frac{Qq}{mr}}$

R. 11 Duas cargas puntiformes $Q_1 = 10^{-6}$ C e $Q_2 = 4 \cdot 10^{-6}$ C estão fixas nos pontos *A* e *B* e separadas pela distância *d* = 30 cm no vácuo. Sendo a constante eletrostática do vácuo $k_0 = 9 \cdot 10^9 \frac{N \cdot m^2}{C^2}$, determine:

a) a intensidade da força elétrica de repulsão;

b) a intensidade da força elétrica resultante sobre uma terceira carga $Q_3 = 2 \cdot 10^{-6}$ C, colocada no ponto médio do segmento que une Q_1 a Q_2;

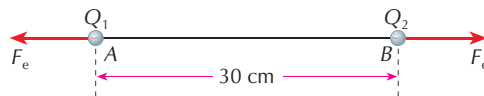
c) a posição em que Q_3 deve ser colocada para ficar em equilíbrio sob a ação de forças elétricas somente.

Solução:

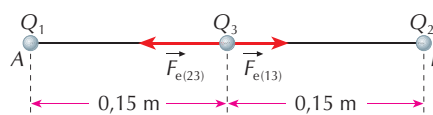
a) Pela lei de Coulomb, temos:

$$F_e = k_0 \cdot \frac{|Q_1| \cdot |Q_2|}{d^2}$$

Sendo $Q_1 = 10^{-6}$ C, $Q_2 = 4 \cdot 10^{-6}$ C,

$k_0 = 9 \cdot 10^9 \frac{N \cdot m^2}{C^2}$ e d = 30 cm = 0,3 m, decorre: $F_e = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{10^{-6} \cdot 4 \cdot 10^{-6}}{(0,3)^2} \Rightarrow \boxed{F_e = 0,4 \text{ N}}$

b) Q_1 repele Q_3 com força $\vec{F}_{e(13)}$.
Q_2 repele Q_3 com força $\vec{F}_{e(23)}$.
Pela lei de Coulomb, temos:

$$F_{e(13)} = k_0 \cdot \frac{|Q_1| \cdot |Q_3|}{d^2} \Rightarrow F_{e(13)} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^{-6}}{(0,15)^2} \Rightarrow F_{e(13)} = 0,8 \text{ N}$$

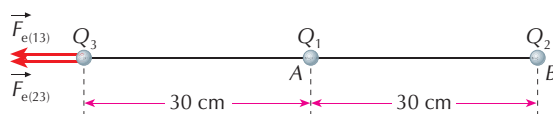
$$F_{e(23)} = k_0 \cdot \frac{|Q_2| \cdot |Q_3|}{d^2} \Rightarrow F_{e(23)} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{4 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^{-6}}{(0,15)^2} \Rightarrow F_{e(23)} = 3,2 \text{ N}$$

Assim, em Q_3 agem as forças:

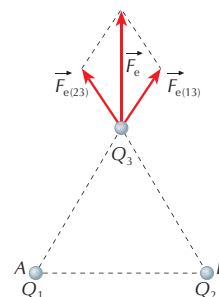
Portanto, a força elétrica resultante tem intensidade: $F_e = 3,2 - 0,8 \Rightarrow \boxed{F_e = 2,4 \text{ N}}$

c) Para ficar em equilíbrio somente sob a ação de forças elétricas, Q_3 deve ser colocada entre Q_1 e Q_2 e mais próxima de Q_1 (carga menor).
No equilíbrio $\vec{F}_{e(13)}$ e $\vec{F}_{e(23)}$ devem ter a mesma direção, sentidos opostos e mesma intensidade:
$F_{e(13)} = F_{e(23)}$

$$k_0 \cdot \frac{|Q_1| \cdot |Q_3|}{x^2} = k_0 \cdot \frac{|Q_2| \cdot |Q_3|}{(0,3 - x)^2} \Rightarrow \frac{|Q_1|}{x^2} = \frac{|Q_2|}{(0,3 - x^2)} \Rightarrow \frac{10^{-6}}{x^2} = \frac{4 \cdot 10^{-6}}{(0,3 - x)^2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{1}{x^2} = \frac{4}{(0,3 - x)^2} \Rightarrow 3x^2 + 0,6x - 0,09 = 0 \Rightarrow \begin{cases} \boxed{x = 0,1 \text{ m} = 10 \text{ cm}} \\ \text{e} \\ x' = -0,3 \text{ m} = -30 \text{ cm} \end{cases}$$

A resposta x = −30 cm é inadequada, pois significa 30 cm à esquerda de A. Nesse ponto, embora $\vec{F}_{e(13)}$ e $\vec{F}_{e(23)}$ tenham mesma intensidade, têm também mesmo sentido:

Observação:
Fora da reta $\overleftrightarrow{AB}$ não é possível Q_3 ficar em equilíbrio sob ação das forças elétricas somente. Nesse caso, forças elétricas que atuam em Q_3 apresentam resultante $\vec{F}_e \neq \vec{0}$.

Resposta: a) 0,4 N; b) 2,4 N; c) 10 cm à direita da carga A

R. 12 Duas pequenas esferas eletrizadas com carga $+Q$ estão fixas numa canaleta horizontal, isolante e sem atrito. Uma pequena esfera eletrizada é colocada exatamente no ponto médio entre as duas e pode mover-se sobre a canaleta. Supondo as cargas puntiformes, analise o equilíbrio da terceira esfera, dizendo se é estável, instável ou indiferente nos casos:

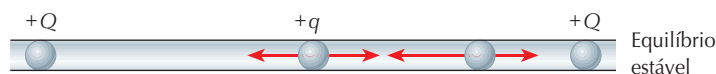
a) a carga central é $+q$;

b) a carga central é $-q$.

Solução:

Para saber se o equilíbrio é estável, instável ou indiferente, basta dar à partícula um pequeno deslocamento a partir da posição de equilíbrio. Se a partícula tende a voltar à posição de equilíbrio, ele é estável: afastando-se, é instável e, se ficar na nova posição, é indiferente.

a) A carga $+q$, ao ser deslocada da posição de equilíbrio (conforme a figura), será repelida mais intensamente pela carga $+Q$ da direita, tendendo a voltar à posição de equilíbrio. Portanto, o equilíbrio é estável.

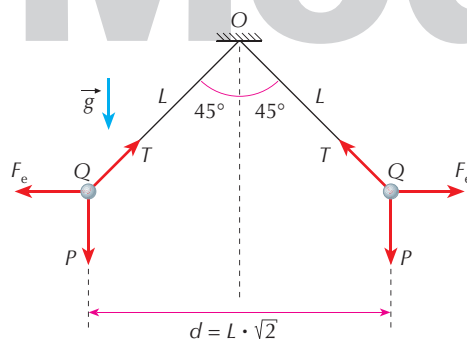
Equilíbrio estável

b) A carga $-q$, ao ser deslocada da posição de equilíbrio (conforme a figura), será atraída mais intensamente pela carga $+Q$ da direita, afastando-se da posição de equilíbrio. O equilíbrio é instável.

Equilíbrio instável

Resposta: a) O equilíbrio é estável. b) O equilíbrio é instável.

R. 13 Duas pequenas esferas metálicas iguais são suspensas de um ponto O por dois fios isolantes de mesmo comprimento $L = 0,5$ m. As esferas são igualmente eletrizadas com carga $Q = 1,0$ μC. Sabendo-se que, na posição de equilíbrio, os fios formam com a vertical ângulos de 45°, determine o peso de cada esfera. O meio é o vácuo, cuja constante eletrostática é $k_0 = 9 \cdot 10^9 \frac{N \cdot m^2}{C^2}$.

Solução:

Na figura, desenhamos as forças em cada pequena esfera: repulsão elétrica (F_e), peso (P) e tração do fio (T).

Como a partícula está em **equilíbrio, a linha poligonal das forças deve ser fechada**.

Do triângulo formado pelas forças, temos: $\text{tg } 45° = \frac{F_e}{P}$

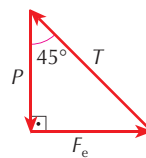
Sendo $\text{tg } 45° = 1$, resulta: $P = F_e$

Pela lei de Coulomb: $P = F_e = k_0 \cdot \frac{|Q| \cdot |Q|}{d^2}$

Sendo $k_0 = 9 \cdot 10^9 \frac{N \cdot m^2}{C^2}$, $Q = 1,0$ μC $= 1,0 \cdot 10^{-6}$ C e $d = L \cdot \sqrt{2} = 0,5 \cdot \sqrt{2}$ m, temos:

$$P = F_e = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{1,0 \cdot 10^{-6} \cdot 1,0 \cdot 10^{-6}}{(0,5 \cdot \sqrt{2})^2}$$

$$\boxed{P = F_e = 1,8 \cdot 10^{-2} \text{ N}}$$

Resposta: $1,8 \cdot 10^{-2}$ N

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

Nos exercícios seguintes, considere conhecida a constante eletrostática do vácuo: $k_0 = 9 \cdot 10^9 \frac{N \cdot m^2}{C^2}$

P. 4 A que distância devem ser colocadas duas cargas positivas e iguais a 1 μC, no vácuo, para que a força elétrica de repulsão entre elas tenha intensidade de 0,1 N?

P. 5 Duas cargas elétricas positivas e puntiformes, das quais uma é o triplo da outra, repelem-se com forças de intensidades 2,7 N no vácuo, quando a distância entre elas é de 10 cm. Determine a menor das cargas.

P. 6 Se um corpo inicialmente neutro é eletrizado com uma carga $Q = -56$ mC, quantos elétrons ele recebeu nesse processo? Dado: $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C

P. 7 Dois corpos de dimensões desprezíveis têm massas iguais a 2 kg, estando colocados no vácuo a 2 m um do outro. Cada um deles está eletrizado com carga $Q = 25$ μC. Calcule:

a) a intensidade da força de atração gravitacional $\vec{F}_G$ entre eles;

b) a intensidade da força de repulsão elétrica $\vec{F}_e$ entre eles;

c) a relação entre as intensidades de $\vec{F}_e$ e $\vec{F}_G$.

$\left(\text{Dado: } G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{N \cdot m^2}{kg^2}\right)$

P. 8 Duas pequenas esferas idênticas estão situadas no vácuo, a uma certa distância d, aparecendo entre elas uma força elétrica de intensidade $F_{e(1)}$. A carga de uma é o dobro da carga da outra. As duas pequenas esferas são colocadas em contato e, a seguir, afastadas a uma distância $2d$, aparecendo entre elas uma força elétrica de intensidade $F_{e(2)}$.

Calcule a razão $\frac{F_{e(1)}}{F_{e(2)}}$.

P. 9 Três pequenas esferas A, B e C com cargas elétricas respectivamente iguais a 2Q, Q e Q estão alinhadas como mostra a figura. A esfera A exerce sobre B uma força elétrica de intensidade $2,0 \cdot 10^{-6}$ N. Qual a intensidade da força elétrica resultante que A e C exercem sobre B?

P. 10 (Vunesp) Em um modelo atômico simples, proposto por Bohr em 1913, um núcleo contendo prótons e nêutrons é rodeado por elétrons que giram em órbitas circulares de raio r_n, onde a força de atração elétrica do núcleo positivo sobre cada elétron segue a lei de Coulomb.

Utilizando esse modelo para o caso do átomo de hidrogênio (um único elétron girando em torno de um núcleo que contém um próton):

a) determine a direção, o sentido e a expressão para o módulo da força elétrica, atuando sobre o elétron, em função da carga e do elétron, do raio r_n e da constante eletrostática do vácuo k;

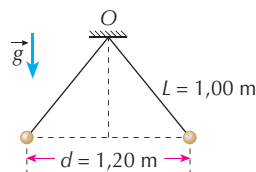
b) determine a expressão para a velocidade v da órbita do elétron em função da carga e e da massa m_e do elétron, do raio r_n e da constante eletrostática do vácuo k.

P. 11 Duas cargas elétricas puntiformes $Q_1 = 8 \cdot 10^{-8}$ C e $Q_2 = -2 \cdot 10^{-8}$ C estão fixas no vácuo, separadas por uma distância $d = 6$ cm. Determine:

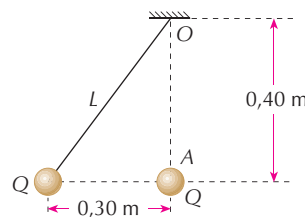
a) a intensidade da força elétrica de atração;

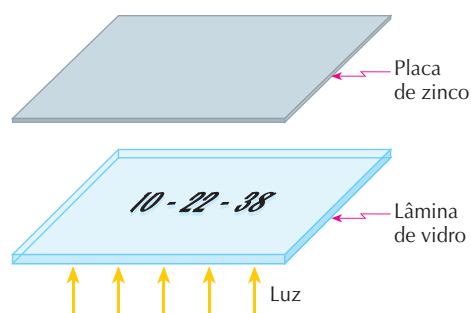
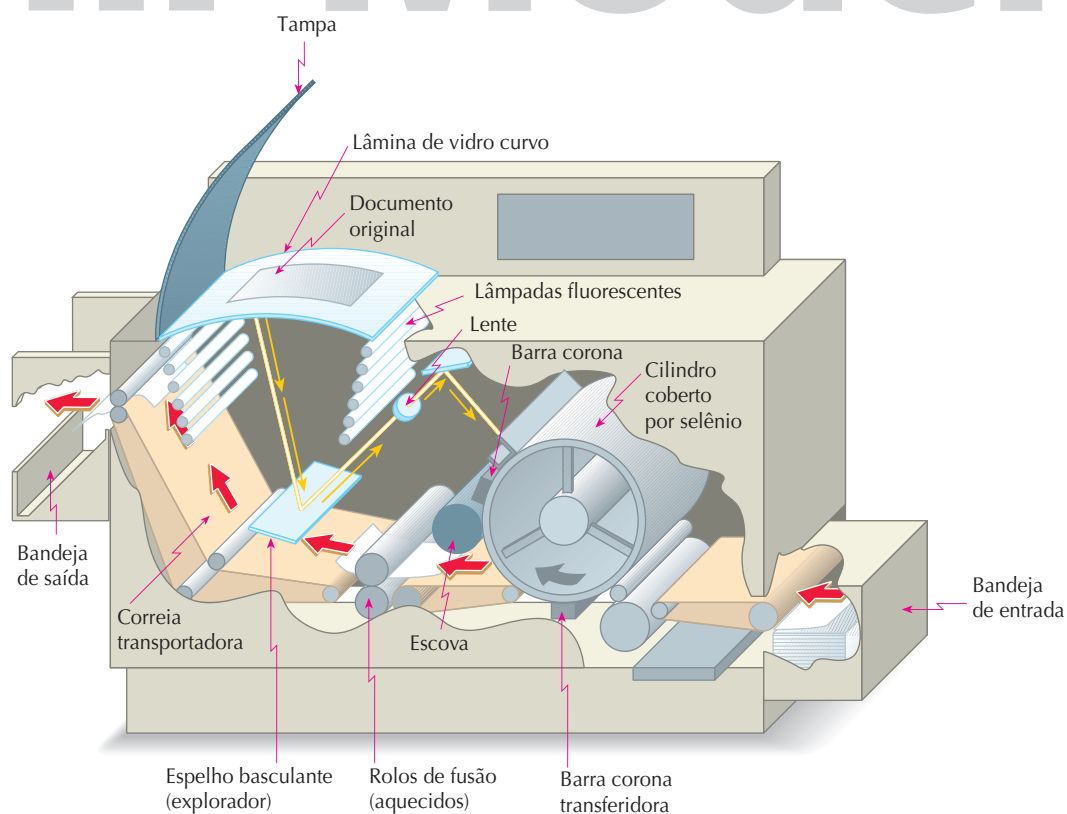
b) a intensidade da força elétrica resultante, que age sobre uma carga $Q_3 = 10^{-8}$ C, colocada no ponto médio do segmento que une Q_1 a Q_2;

c) a posição em que Q_3 deve ser colocada de modo que fique em equilíbrio somente sob a ação de forças elétricas.

P. 12 Duas esferas condutoras idênticas e muito pequenas, de massa $m = 0,30$ g, encontram-se no vácuo suspensas por meio de dois fios leves, isolantes, de comprimentos iguais $L = 1,00$ m, presos a um mesmo ponto de suspensão O. Estando as esferas separadas, eletriza-se uma delas com carga Q, mantendo-se a outra neutra. Em seguida, elas são colocadas em contato e depois abandonadas. Verifica-se que na posição de equilíbrio a distância que as separa é $d = 1,20$ m. Considere $Q > 0$.
(Adote: aceleração da gravidade $g = 10$ m/s².)

a) Determine o valor de Q.

b) Determine o valor da carga q que deve ser colocada no ponto O a fim de que sejam nulas as forças de tração nos fios.

P. 13 Um pêndulo elétrico de comprimento L e massa $m = 0,12$ kg eletrizado com carga Q é repelido por outra carga igual fixa no ponto A. A figura mostra a posição de equilíbrio do pêndulo.
Sendo $g = 10$ m/s², calcule Q.

A xerografia

O processo de copiagem conhecido como **xerografia** (do grego: *xeros* = seca; *grafia* = escrita) foi inventado pelo advogado norte-americano Chester Carlson, que obteve sua patente em 1938. Em sua experiência original, Carlson recobriu de enxofre uma placa de zinco e eletrizou-a por atrito com algodão. Sobre uma lâmina de vidro escreveu a nanquim a data do experimento: 10-22-38. Encostando a placa na lâmina e iluminando o conjunto, verificou que a placa se descarregava, exceto na região que permanecia escura (a parte escrita). Pulverizando então a placa com pó de licopódio (planta rasteira), este aderia às partes eletrizadas, reproduzindo a imagem do texto escrito. Ao comprimir uma folha de papel sobre a placa e aquecendo o conjunto, os dizeres tingidos pelo pó apareceram: estava pronta a cópia desejada.

Modernamente, a imagem do original é projetada, por meio de lentes e espelhos, sobre um cilindro metálico previamente eletrizado e recoberto por selênio, substância que conduz eletricidade apenas quando exposta à luz. Assim, ao se produzir a iluminação, o cilindro só se descarrega na parte não escrita. A parte escrita (escura) mantém a eletrização e atrai o pó tonalizador (*toner*), que adere a uma folha de papel que passa pelo cilindro. A imagem formada é então fixada por pressão e aquecimento: está pronta a cópia desejada.

EXERCÍCIOS PROPOSTOS DE RECAPITULAÇÃO

P. 14 (UFRJ) Três pequenas esferas metálicas idênticas, A, B e C, estão suspensas, por fios isolantes, de três suportes. Para testar se elas estão carregadas, realizam-se três experimentos durante os quais se verifica como elas interagem eletricamente, duas a duas:

Experimento 1

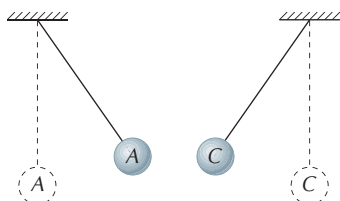



Figura I.

As esferas A e C, ao serem aproximadas, atraem-se eletricamente.

Experimento 2

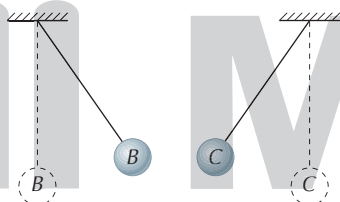



Figura II.

As esferas B e C, ao serem aproximadas, também se atraem eletricamente.

Experimento 3

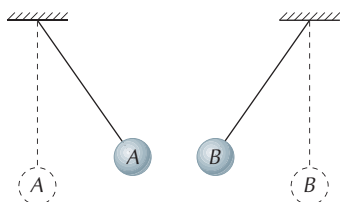



Figura III.

As esferas A e B, ao serem aproximadas, também se atraem eletricamente.

Formulam-se três hipóteses:

a) As três esferas estão carregadas.

b) Apenas duas esferas estão carregadas com cargas de mesmo sinal.

c) Apenas duas esferas estão carregadas, mas com cargas de sinais contrários.

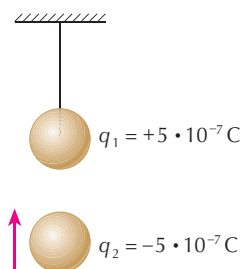
Analisando os resultados dos três experimentos, indique a hipótese correta. Justifique sua resposta.

P. 15 (Vunesp) Uma pequena esfera, P, carregada positivamente, está fixa e isolada numa região onde o valor da aceleração da gravidade é g. Uma outra pequena esfera, Q, também eletricamente carregada, é levada para as proximidades de P. Há duas posições, a certa distância d de P, onde pode haver equilíbrio entre a força peso atuando em Q e a força elétrica exercida por P sobre Q. O equilíbrio ocorre numa ou noutra posição, dependendo do sinal da carga de Q. Despreze a força gravitacional entre as esferas.

a) Desenhe um esquema mostrando a esfera P, a direção e o sentido de $\vec{g}$ e as duas posições possíveis definidas pela distância d para o equilíbrio entre as forças sobre Q, indicando, em cada caso, o sinal da carga de Q.

b) Suponha que a esfera Q seja trazida, a partir de qualquer uma das duas posições de equilíbrio, para mais perto de P, até ficar à distância $\frac{d}{2}$ desta, e então abandonada nessa nova posição. Determine, exclusivamente em termos de g, o módulo da aceleração da esfera Q no instante em que ela é abandonada.

P. 16 (Unicamp-SP) Uma pequena esfera isolante de massa igual a $5 \cdot 10^{-2}$ kg e carregada com uma carga positiva de $5 \cdot 10^{-7}$ C está presa ao teto por um fio de seda. Uma segunda esfera com carga negativa de $-5 \cdot 10^{-7}$ C, movendo-se na direção vertical, é aproximada da primeira.

Considere $k_0 = 9 \cdot 10^9 \frac{N \cdot m^2}{C^2}$.

a) Calcule a força eletrostática entre as duas esferas quando a distância entre os seus centros é de 0,5 m.

b) Para uma distância de $5 \cdot 10^{-2}$ m entre os centros, o fio de seda se rompe. Determine a tração máxima suportada pelo fio.

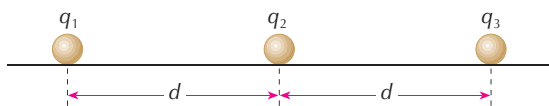
P. 17 (ITA-SP) Três pequenas esferas são dotadas de cargas elétricas q_1, q_2 e q_3. Sabe-se que:

1) as esferas encontram-se no vácuo sobre um plano horizontal sem atrito;

2) os centros das esferas encontram-se sobre um mesmo plano horizontal;

3) as esferas encontram-se em equilíbrio, nas posições representadas no esquema;

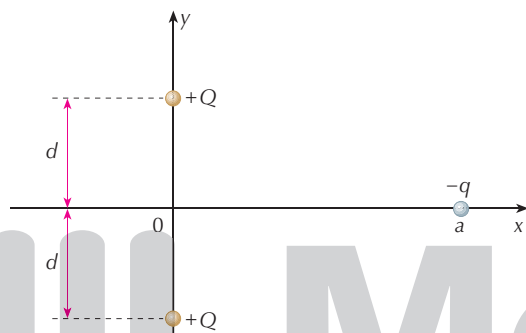
4) a carga da esfera intermediária é positiva e tem valor $q_2 = 2{,}70 \cdot 10^{-4}$ C;

5) a distância entre as esferas tem valor $d = 0{,}12$ m.

a) Determine os sinais das cargas q_1 e q_3, justificando a resposta.

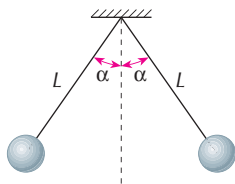
b) Calcule os valores das cargas q_1 e q_3.

c) Uma vez fixadas em suas posições as esferas de cargas q_1 e q_3, qual o tipo de equilíbrio (estável, instável ou indiferente) da esfera intermediária? Justifique.

P. 18 (Unicamp-SP) Considere o sistema de cargas na figura. As cargas +Q estão fixas e a carga $-q$ pode mover-se somente sobre o eixo x.

Solta-se a carga $-q$, inicialmente em repouso, em $x = a$.

a) Em que ponto do eixo x a velocidade de $-q$ é máxima?

b) Em que ponto(s) do eixo x a velocidade de $-q$ é nula?

P. 19 (Unifesp) Na figura, estão representadas duas pequenas esferas de mesma massa, $m = 0{,}0048$ kg, eletrizadas com cargas de mesmo sinal, repelindo-se no ar. Elas estão penduradas por fios isolantes muito leves, inextensíveis, de mesmo comprimento, $L = 0{,}090$ m. Observa-se que, com o tempo, essas esferas se aproximam e os fios tendem a tornar-se verticais.

a) O que causa a aproximação dessas esferas? Durante essa aproximação, os ângulos que os fios formam com a vertical são sempre iguais ou podem tornar-se diferentes um do outro? Justifique.

b) Suponha que, na situação da figura, o ângulo α é tal que sen α = 0,60; cos α = 0,80; tg α = 0,75 e as esferas têm cargas iguais. Qual é, nesse caso, a carga elétrica de cada esfera?

$\left(\text{Admita } g = 10 \text{ m/s}^2 \text{ e } k_0 = 9{,}0 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}.\right)$

P. 20 (UFG-GO) Considere a situação hipotética esquematizada na **figura I**, onde duas esferas idênticas de massa $m = 90$ g, carregadas com cargas de 2 μC cada, estão separadas por 20 cm.

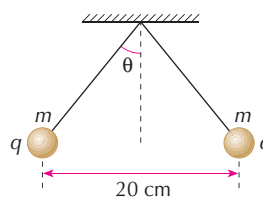



Figura I. **Esferas carregadas com cargas de 2 μC cada.**

Dobram-se as cargas nas esferas e, para que não saiam de suas posições, prende-se uma mola entre elas, como na **figura II**.

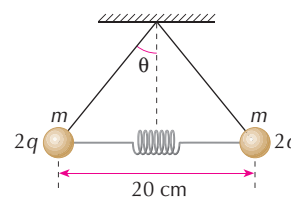



Figura II. **Esferas carregadas com cargas de 4 μC cada e ligadas por uma mola.**

A mola distende-se 1,0 cm. Qual a constante elástica da mola?

(Adote $g = 10$ m/s² e $k_0 = 9{,}0 \cdot 10^9$ Nm²/C².)

P. 21 (UFRJ) Duas cargas, q e $-q$, são mantidas fixas a uma distância d uma da outra. Uma terceira carga q_0 é colocada no ponto médio entre as duas primeiras, como ilustra a **figura I**.

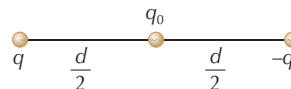



Figura I.

Nessa situação, o módulo da força eletrostática resultante sobre a carga q_0 vale F_A. A carga q_0 é então afastada dessa posição ao longo da mediatriz entre as duas outras até atingir o ponto P, onde é fixada, como ilustra a **figura II**.

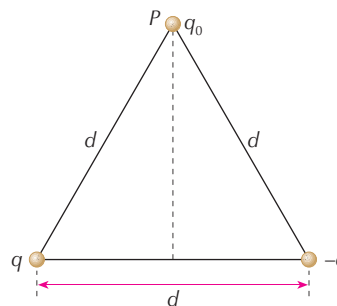
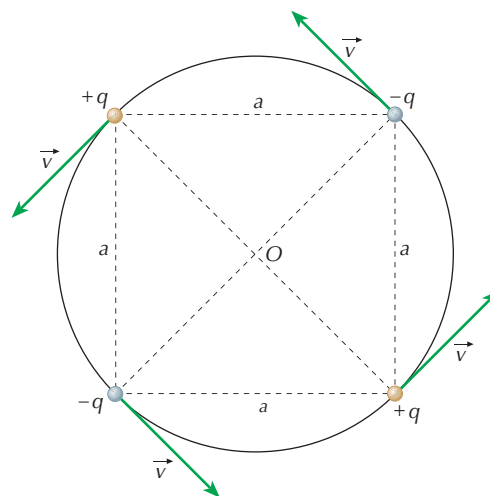



Figura II.

Agora, as três cargas estão nos vértices de um triângulo equilátero. Nessa situação, o módulo da força eletrostática resultante sobre a carga q_0 vale F_B. Calcule a razão $\frac{F_A}{F_B}$.

P. 22 (Fuvest-SP) Quatro pequenas esferas de massa m estão carregadas com cargas de mesmo valor absoluto q, sendo duas negativas e duas positivas, como mostra a figura. As esferas estão dispostas formando um quadrado de lado a e giram numa trajetória circular de centro O, no plano do quadrado, com velocidade de módulo constante v. Suponha que as únicas forças atuantes sobre as esferas são devidas à interação eletrostática. A constante eletrostática do meio é k_0. Todas as grandezas (dadas e solicitadas) estão em unidades SI.

a) Determine a expressão do módulo da força eletrostática resultante F_R que atua em cada esfera e dê sua direção.

b) Determine a expressão do módulo da velocidade tangencial $\vec{v}$ das esferas.

TESTES PROPOSTOS

T. 1 (UFSCar-SP) Atritando vidro com lã, o vidro se eletriza com carga positiva e a lã, com carga negativa. Atritando algodão com enxofre, o algodão adquire carga positiva e o enxofre, negativa. Porém, se o algodão for atritado com lã, o algodão adquire carga negativa e a lã, positiva. Quando atritado com algodão e quando atritado com enxofre, o vidro adquire, respectivamente, carga elétrica:

a) positiva e positiva.
b) positiva e negativa.
c) negativa e positiva.
d) negativa e negativa.
e) negativa e nula.

T. 2 (UFSCar-SP) Considere dois corpos sólidos envolvidos em processos de eletrização. Um dos fatores que pode ser observado tanto na eletrização por contato quanto na por indução é o fato de que, em ambas:

a) torna-se necessário manter um contato direto entre os corpos.
b) deve-se ter um dos corpos ligado temporariamente a um aterramento.
c) ao fim do processo de eletrização, os corpos adquirem cargas elétricas de sinais opostos.
d) um dos corpos deve, inicialmente, estar carregado eletricamente.
e) para ocorrer, os corpos devem ser bons condutores elétricos.

T. 3 (Olimpíada Brasileira de Física) Ao se esfregar um canudinho de refrigerante com um pedaço de lã e aproximá-lo de uma parede ele poderá ficar "grudado" na parede. Isto se justifica porque:

a) prótons passam da lã para o canudinho deixando-o eletrizado positivamente e isso o prende aos elétrons dos átomos que estão na parede.
b) ocorre uma transferência de elétrons da lã para o canudinho e, ao colocá-lo em contato com a parede, ocorre a descarga desse excesso de elétrons, ficando o canudinho preso até que a descarga termine.
c) ocorre indução de cargas elétricas na parede, que passam para o canudinho e, devido à atração entre essas cargas, surge uma força elétrica que aumenta a força normal e equilibra o peso do canudinho.
d) com o atrito, o canudinho se eletriza pela retirada de alguns de seus prótons, o que o deixa eletricamente negativo, sendo, portanto, atraído pelos prótons da parede.
e) o canudinho fica eletrizado e, por ser um mau condutor, não perde esse excesso de carga para a parede, ficando assim preso a ela por forças elétricas entre as cargas do canudinho e as induzidas na parede.

T. 4 (Fuvest-SP) Têm-se três esferas condutoras idênticas A, B e C. As esferas A (carga positiva) e B (carga negativa) estão eletrizadas com cargas de mesmo módulo Q, e a esfera C está inicialmente neutra. São realizadas as seguintes operações:

1ª) Toca-se C em B, com A mantida a distância, e em seguida separa-se C de B;
2ª) Toca-se C em A, com B mantida a distância, e em seguida separa-se C de A;
3ª) Toca-se A em B, com C mantida a distância, e em seguida separa-se A de B. Podemos afirmar que a carga final da esfera A vale:

a) zero
b) $+\frac{Q}{2}$
c) $-\frac{Q}{4}$
d) $+\frac{Q}{6}$
e) $-\frac{Q}{8}$

T. 5 (UFF-RJ) Um aluno tem 4 esferas idênticas, pequenas e condutoras (*A*, *B*, *C* e *D*), carregadas com cargas respectivamente iguais a $-2Q$, $4Q$, $3Q$ e $6Q$. A esfera *A* é colocada em contato com a esfera *B* e a seguir com as esferas *C* e *D*. Ao final do processo a esfera *A* estará carregada com carga equivalente a:

a) 3Q
b) 4Q
c) $\frac{Q}{2}$
d) 8Q
e) 5,5Q

T. 6 (PUC-SP) Duas esferas *A* e *B*, metálicas e idênticas, estão carregadas com cargas respectivamente iguais a 16 μC e 4 μC. Uma terceira esfera *C*, metálica e idêntica às anteriores, está inicialmente descarregada. Coloca-se *C* em contato com *A*. Em seguida, esse contato é desfeito e a esfera *C* é colocada em contato com *B*. Supondo que não haja troca de cargas elétricas com o meio exterior, a carga final de *C* é de:

a) 8 μC
b) 6 μC
c) 4 μC
d) 3 μC
e) nula

T. 7 (Fesp-PE) Quatro corpos *A*, *B*, *C* e *D* formam um sistema eletricamente isolado. Inicialmente tem-se que $Q_A = 6$ μC, $Q_B = -2$ μC, $Q_C = 4$ μC e $Q_D = -4$ μC. O corpo *A* cede 2 μC ao corpo *B* e o corpo *C* cede 1 μC ao corpo *D*. Identifique a afirmação incorreta:

a) O corpo *B* ficou eletricamente neutro.
b) A carga total após a transferência é de 4 μC.
c) A soma algébrica das quantidades de carga elétrica é constante.
d) O corpo *A*, antes e depois, tem carga elétrica positiva.
e) Após a transferência de carga, os corpos *C* e *D* ficaram eletricamente positivos.

T. 8 (UCSal-BA) Uma esfera condutora eletrizada com carga $Q = 6{,}00$ μC é colocada em contato com outra, idêntica, eletrizada com carga $q = -2{,}00$ μC. Admitindo-se que haja troca de cargas apenas entre essas duas esferas, o número de elétrons que passa de uma esfera para a outra até atingir o equilíbrio eletrostático é:

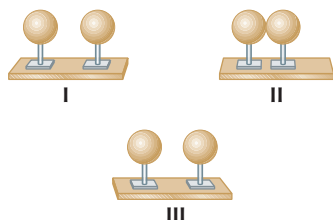
a) $5{,}00 \cdot 10^{19}$
b) $2{,}50 \cdot 10^{16}$
c) $5{,}00 \cdot 10^{14}$
d) $2{,}50 \cdot 10^{13}$
e) $1{,}25 \cdot 10^{13}$

(Dado: carga elementar $= 1{,}60 \cdot 10^{-19}$ C)

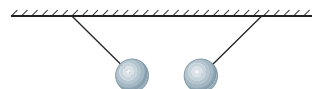
T. 9 (UFMG) Duas esferas metálicas idênticas – uma carregada com carga elétrica negativa e a outra eletricamente descarregada – estão montadas sobre suportes isolantes. Na situação inicial, mostrada na **figura** I, as esferas estão separadas uma da outra. Em seguida, as esferas são colocadas em contato, como se vê na **figura** II. As esferas são, então, afastadas uma da outra, como mostrado na **figura** III.

I

II

III

Considerando-se as situações representadas nas figuras I e III, é correto afirmar que:

a) em I as esferas se atraem e em III elas se repelem.
b) em I as esferas se repelem e em III elas se atraem.
c) em I não há força entre as esferas.
d) em III não há força entre as esferas.

T. 10 (UFMG) Um professor mostra uma situação em que duas esferas metálicas idênticas estão suspensas por fios isolantes. As esferas se aproximam uma da outra, como indicado na figura.

Três estudantes fizeram os seguintes comentários sobre essa situação:

Cecília – uma esfera tem carga positiva e a outra está neutra.
Heloísa – uma esfera tem carga negativa e a outra tem carga positiva.
Rodrigo – uma esfera tem carga negativa e a outra está neutra.

Identifique a alternativa correta.

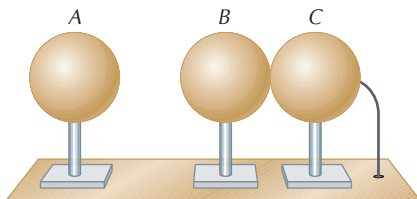
a) Apenas Heloísa e Rodrigo fizeram comentários pertinentes.
b) Todos os estudantes fizeram comentários pertinentes.
c) Apenas Cecília e Rodrigo fizeram comentários pertinentes.
d) Apenas Heloísa fez um comentário pertinente.

T. 11 (Unifesp) Uma estudante observou que, ao colocar sobre uma mesa horizontal três pêndulos eletrostáticos idênticos, equidistantes entre si, como se cada um ocupasse o vértice de um triângulo equilátero, as esferas dos pêndulos se atraíram mutuamente. Sendo as três esferas metálicas, a estudante concluiu corretamente que:

a) as três esferas estavam eletrizadas com cargas de mesmo sinal.
b) duas esferas estavam eletrizadas com cargas de mesmo sinal e uma com carga de sinal oposto.
c) duas esferas estavam eletrizadas com cargas de mesmo sinal e uma neutra.
d) duas esferas estavam eletrizadas com cargas de sinais opostos e uma neutra.
e) uma esfera estava eletrizada e duas neutras.

T. 12 (UFRGS-RS) Um bastão eletricamente carregado atrai uma bolinha condutora *X*, mas repele uma bolinha condutora *Y*. As bolinhas *X* e *Y* se atraem, na ausência do bastão. Sendo essas forças de atração e repulsão de origem elétrica, conclui-se que:

a) *Y* está eletricamente carregada e *X* está eletricamente descarregada ou eletricamente carregada com cargas de sinal contrário ao das cargas de *Y*.
b) ambas as bolinhas estão eletricamente descarregadas.
c) *X* e *Y* estão eletricamente carregadas com cargas de mesmo sinal.
d) *X* está eletricamente carregada com cargas de mesmo sinal das do bastão.
e) *Y* está eletricamente descarregada e *X*, carregada.

T.13 (Fuvest-SP) Três esferas metálicas iguais, *A*, *B* e *C*, estão apoiadas em suportes isolantes, tendo a esfera *A* carga elétrica negativa. Próximas a ela, as esferas *B* e *C* estão em contato entre si, sendo que *C* está ligada à terra por um fio condutor, como na figura.

A partir dessa configuração, o fio é retirado e, em seguida, a esfera *A* é levada para muito longe. Finalmente, as esferas *B* e *C* são afastadas uma da outra. Após esses procedimentos, as cargas das três esferas satisfazem as relações:

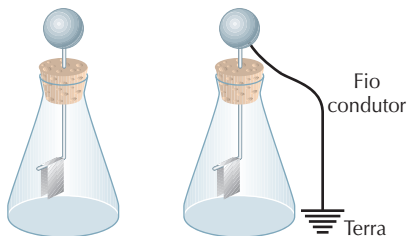
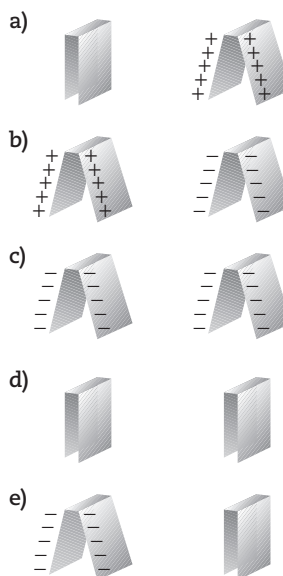
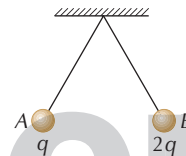
a) $Q_A < 0$; $Q_B > 0$; $Q_C > 0$
b) $Q_A < 0$; $Q_B = 0$; $Q_C = 0$
c) $Q_A = 0$; $Q_B < 0$; $Q_C < 0$
d) $Q_A > 0$; $Q_B > 0$; $Q_C = 0$
e) $Q_A > 0$; $Q_B < 0$; $Q_C > 0$

T.14 (Fuvest-SP) Três esferas de isopor, *M*, *N* e *P*, estão suspensas por fios isolantes. Quando se aproxima *N* de *P*, nota-se uma repulsão entre essas esferas; quando se aproxima *N* de *M*, nota-se uma atração.

	Cargas		
Possibilidades	***M***	***N***	***P***
1ª	+	+	−
2ª	−	−	+
3ª	zero	−	zero
4ª	−	+	+
5ª	+	−	−

Das possibilidades apontadas na tabela, quais são compatíveis com as observações?

a) 1ª e 3ª
b) 2ª e 4ª
c) 3ª e 5ª
d) 4ª e 5ª
e) 1ª e 2ª

T.15 (Efoa-MG) As figuras abaixo ilustram dois eletroscópios. O da esquerda está totalmente isolado da vizinhança e o da direita está ligado à Terra por um fio condutor de eletricidade.

Das figuras a seguir, a que melhor representa as configurações das partes móveis dos eletroscópios quando aproximarmos das partes superiores de ambos um bastão carregado negativamente é:

T.16 (Univale-MG) Duas esferas metálicas pequenas, *A* e *B*, de massas iguais, suspensas por fios isolantes, conforme representa a figura, são carregadas com cargas elétricas positivas que valem respectivamente q na esfera *A* e $2q$ na esfera *B*.

Sendo F_1 a intensidade da força elétrica exercida por *A* sobre *B*, e F_2 a intensidade da força elétrica exercida por *B* sobre *A*, pode-se afirmar que:

a) $F_1 = F_2$
b) $F_1 = 2F_2$
c) $F_2 = 2F_1$
d) $F_1 = 4F_2$
e) $F_2 = 4F_1$

T.17 (Vunesp) Identifique a alternativa que apresenta o que as forças dadas pela lei da gravitação universal de Newton e pela lei de Coulomb têm em comum.

a) Ambas variam com a massa das partículas que interagem.
b) Ambas variam com a carga elétrica das partículas que interagem.
c) Ambas variam com o meio em que as partículas interagem.
d) Ambas variam com o inverso do quadrado da distância entre as partículas que interagem.
e) Ambas podem ser tanto de atração como de repulsão entre as partículas que interagem.

T.18 (PUC-RJ) Inicialmente, a força elétrica atuando entre dois corpos, *A* e *B*, separados por uma distância d, é repulsiva e vale F. Se retirarmos metade da carga do corpo *A*, qual deve ser a nova separação entre os corpos para que a força entre eles permaneça igual a F?

a) d
b) $\frac{d}{2}$
c) $\frac{d}{\sqrt{2}}$
d) $\frac{d}{\sqrt{3}}$
e) $\frac{d}{3}$

T. 19 (FMTM-MG) A distância entre duas partículas carregadas é d e a força de interação entre elas é F. Suponha que elas sejam afastadas entre si a distâncias iguais a $2d$, $3d$ e $4d$, sem que nada mais se altere além da distância. A alternativa, com os respectivos valores assumidos pela força de interação entre elas, é:

a) 2F, 3F e 4F
b) 4F, 9F e 16F
c) $\frac{F}{2}$, $\frac{F}{3}$ e $\frac{F}{4}$
d) $\frac{F}{4}$, $\frac{F}{9}$ e $\frac{F}{16}$
e) 4F, 6F e 8F

T. 20 (Mackenzie-SP) Duas esferas metálicas idênticas, separadas pela distância d, estão eletrizadas com cargas elétricas Q e -5Q. Essas esferas são colocadas em contato e em seguida são separadas de uma distância $2d$. A força de interação eletrostática entre as esferas, antes do contato, tem módulo F_1 e, após o contato, tem módulo F_2. A relação $\frac{F_1}{F_2}$ é:

a) 1
b) 2
c) 3
d) 4
e) 5

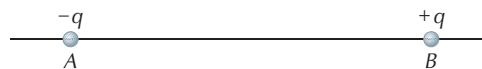
T. 21 (UFPI) Duas massas iguais de 4,8 gramas cada uma, originalmente neutras, estão fixadas em pontos separados entre si pela distância d. Um número n de elétrons é retirado de cada uma das massas de modo que a força de repulsão eletrostática entre elas compense exatamente a força de atração gravitacional. A constante da lei de Coulomb é dada por $k_0 = 9{,}0 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}$, a constante da lei de Newton da gravitação é $G = 6{,}7 \cdot 10^{-11} \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{kg}^2}$ e a carga elementar é $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C. O número n de elétrons retirados de cada uma das massas é igual a:

a) $2{,}6 \cdot 10^2$
b) $2{,}6 \cdot 10^3$
c) $2{,}6 \cdot 10^4$
d) $2{,}6 \cdot 10^5$
e) $2{,}6 \cdot 10^6$

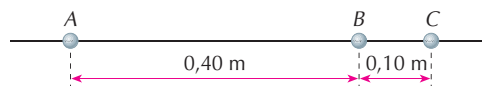
T. 22 (Fuvest-SP) Duas pequenas esferas metálicas idênticas, inicialmente neutras, encontram-se suspensas por fios inextensíveis e isolantes.

Um jato de ar perpendicular ao plano da figura é lançado durante um certo intervalo de tempo sobre as esferas. Observa-se então que ambas as esferas estão fortemente eletrizadas. Quando o sistema alcança novamente o equilíbrio estático, podemos afirmar que as tensões nos fios:

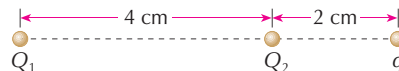
a) aumentaram e as esferas se atraem.
b) diminuíram e as esferas se repelem.
c) aumentaram e as esferas se repelem.
d) diminuíram e as esferas se atraem.
e) não sofreram alterações.

T. 23 (Fuvest-SP) Duas cargas elétricas $-q$ e $+q$ estão fixas nos pontos A e B, conforme a figura. Uma terceira carga positiva Q é abandonada num ponto da reta $\overleftrightarrow{AB}$.

Podemos afirmar que a carga Q:

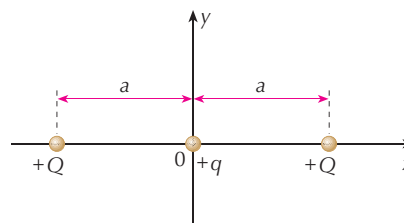
a) permanecerá em repouso se for colocada no meio do segmento $\overline{AB}$.
b) mover-se-á para a direita se for colocada no meio do segmento $\overline{AB}$.
c) mover-se-á para a esquerda se for colocada à direita de B.
d) mover-se-á para a direita se for colocada à esquerda de A.
e) permanecerá em repouso em qualquer posição sobre a reta $\overleftrightarrow{AB}$.

T. 24 (Mackenzie-SP) Três pequenos corpos A, B e C, eletrizados com cargas elétricas idênticas, estão dispostos como mostra a figura.

A intensidade da força elétrica que A exerce em B é 0,50 N. A força elétrica resultante que age sobre o corpo C tem intensidade de:

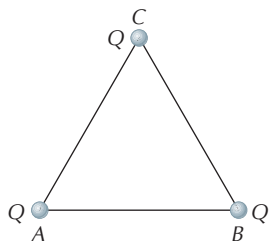
a) 3,20 N
b) 4,68 N
c) 6,24 N
d) 7,68 N
e) 8,32 N

T. 25 (PUC-Campinas-SP) As cargas elétricas puntiformes Q_1 e Q_2, posicionadas em pontos fixos conforme o esquema, mantêm, em equilíbrio, a carga elétrica puntiforme q alinhada com as duas primeiras.

De acordo com as indicações do esquema, o módulo da razão $\frac{Q_1}{Q_2}$ é igual a:

a) 36
b) 9
c) 2
d) $\frac{3}{2}$
e) $\frac{2}{3}$

T. 26 (Cesgranrio-RJ) No esquema a seguir, as cargas $+$Q de mesmo módulo estão fixas, enquanto a carga $+q$, inicialmente em repouso na origem do sistema de eixos, pode deslizar sem atrito sobre os eixos x e y.

O tipo de equilíbrio que a carga $+q$ experimenta nos eixos x e y, respectivamente, é:

a) estável, estável.
b) instável, instável.
c) estável, instável.
d) instável, estável.
e) estável, indiferente.

T. 27 (Fesp-PE) Três cargas elétricas idênticas iguais a Q estão distribuídas nos vértices de um triângulo equilátero de lado d posicionado no plano vertical, de acordo com a figura.

As cargas em A e B estão fixas, enquanto em C a carga está livre. Sendo k a constante eletrostática no vácuo e g a aceleração da gravidade, para que a carga colocada no vértice C permaneça em equilíbrio é necessário que sua massa seja igual a:

a) $\frac{kQ^2}{gd^2}$

b) $\frac{gk}{(Qd)^2}$

c) $\frac{kQ}{(gd)^2}$

d) $\frac{\sqrt{3} \cdot kQ^2}{gd^2}$

e) $\frac{\sqrt{3} \cdot g^2k}{Qd^2}$

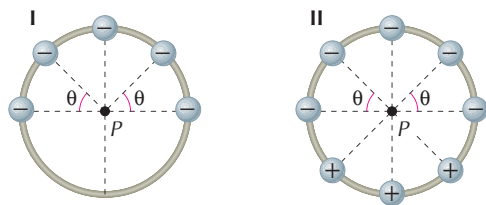
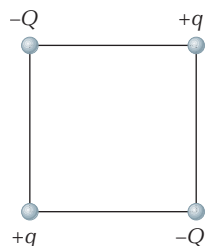
T. 28 (Fuvest-SP) Pequenas esferas, carregadas com cargas elétricas negativas de mesmo módulo Q, estão dispostas sobre um anel isolante e circular, como indicado na figura I. Nessa configuração, a intensidade da força elétrica que age sobre uma carga de prova negativa, colocada no centro do anel (ponto P), é F_1. Se forem acrescentadas sobre o anel três outras cargas de mesmo módulo Q, mas positivas, como na figura II, a intensidade da força elétrica no ponto P passará a ser:

a) zero

b) $\frac{1}{2} \cdot F_1$

c) $\frac{3}{4} \cdot F_1$

d) F_1

e) $2 \cdot F_1$

T. 29 (UEL-PR) Quatro cargas elétricas estão fixadas nos vértices de um quadrado de lado L, como na figura, estando indicados os módulos e os sinais das cargas.

Para que a força elétrica total em uma das cargas $+q$ seja nula, o módulo da carga $-Q$ deve ser igual a:

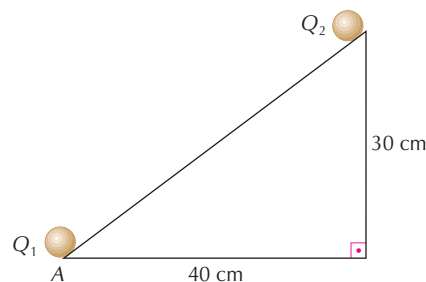
a) $q\sqrt{2}$

b) q

c) $\frac{q}{2}$

d) $\frac{q\sqrt{2}}{2}$

e) $\frac{q\sqrt{2}}{4}$

T. 30 (Mackenzie-SP) Na figura a seguir a carga $Q_1 = 0{,}50$ μC fixa em A tem massa igual a $3{,}0 \cdot 10^{-3}$ kg. A carga Q_2 de massa $1{,}5 \cdot 10^{-3}$ kg é abandonada no topo do plano inclinado perfeitamente liso e permanece em equilíbrio.

Adotando $g = 10$ m/s² e $k_0 = 9{,}0 \cdot 10^9 \frac{N \cdot m^2}{C^2}$, podemos afirmar que a carga Q_2 vale:

a) 10 μC

b) 5,0 μC

c) 1,0 μC

d) 0,50 μC

e) 0,25 μC

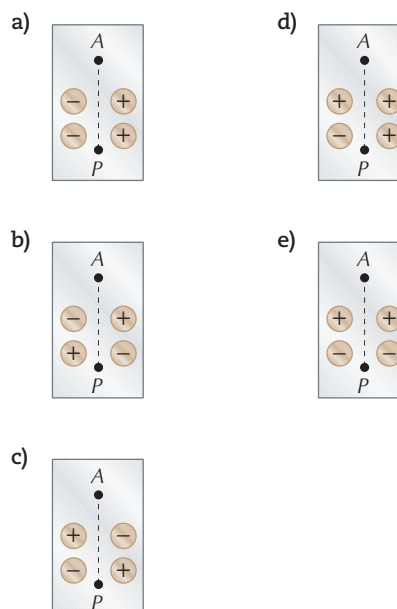
T. 31 (Fuvest-SP) Um pequeno objeto, com carga elétrica positiva, é largado da parte superior de um plano inclinado, no ponto A, e desliza, sem ser desviado, até atingir o ponto P. Sobre o plano, estão fixados 4 pequenos discos com cargas elétricas de mesmo módulo. As figuras representam os discos e os sinais das cargas, vendo-se o plano de cima. Das configurações abaixo, a única compatível com a trajetória retilínea do objeto é:

a)

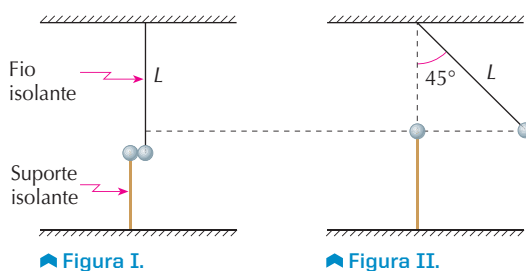
d)

b)

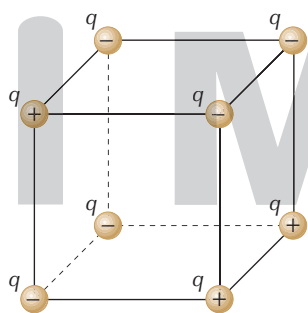
e)

c)

T. 32 (PUC-SP) Duas esferas condutoras iguais estão dispostas conforme a **figura** I. Após receberem uma carga total Q > 0, elas se mantêm na configuração de equilíbrio indicada na **figura** II.

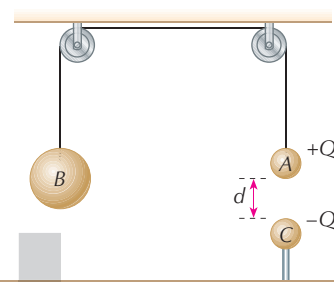
$\left(\text{Dados: comprimento do fio } L = 20 \text{ cm; peso de cada esfera} = 1{,}8 \cdot 10^{-2} \text{ N; e a constante da lei de Coulomb } k = 9 \cdot 10^{9} \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}\right)$

Figura I. Figura II.

A carga de cada esfera em coulomb é:

a) $4{,}00 \cdot 10^{-14}$
b) $2{,}00 \cdot 10^{-7}$
c) $2{,}00 \cdot 10^{-5}$
d) $3{,}24 \cdot 10^{-5}$
e) $3{,}60 \cdot 10^{-2}$

T. 33 (PUC-SP) Em cada um dos vértices de uma caixa cúbica de aresta ℓ foram fixadas cargas elétricas de módulo q cujos sinais estão indicados na figura.

Sendo k a constante eletrostática do meio, o módulo da força elétrica que atua sobre uma carga pontual de módulo $2q$ colocada no ponto de encontro das diagonais da caixa cúbica é:

a) $\frac{4kq^2}{3\ell^2}$
b) $\frac{8kq^2}{3\ell^2}$
c) $\frac{16kq^2}{3\ell^2}$
d) $\frac{8kq^2}{\ell^2}$
e) $\frac{4kq^2}{\ell^2}$

T. 34 (Olimpíada Brasileira de Física) Os corpos A e B, de massas m e M respectivamente, estão atados por uma corda que passa por duas roldanas. O corpo A está carregado com carga $+Q$ e sofre a ação de uma outra carga $-Q$, que se encontra a uma distância d (figura a seguir). Nessa situação, todo o sistema encontra-se em equilíbrio.

Se as massas de A e B quadruplicarem, qual deve ser a nova distância entre as cargas para que o sistema fique em equilíbrio? Considere desprezíveis a massa da corda e o atrito nas roldanas.

a) d
b) $\frac{d}{2}$
c) $\frac{d}{4}$
d) $2d$
e) $4d$

UNIDADE A

Capítulo 2

Campo elétrico

Michael Faraday, cientista e conferencista inglês, introduziu os conceitos de campo elétrico e de linhas de força. Uma carga elétrica colocada num ponto de um campo elétrico fica sujeita a uma força elétrica dada pelo produto da carga pelo vetor campo elétrico associado ao ponto.

2.1 Conceito de campo elétrico

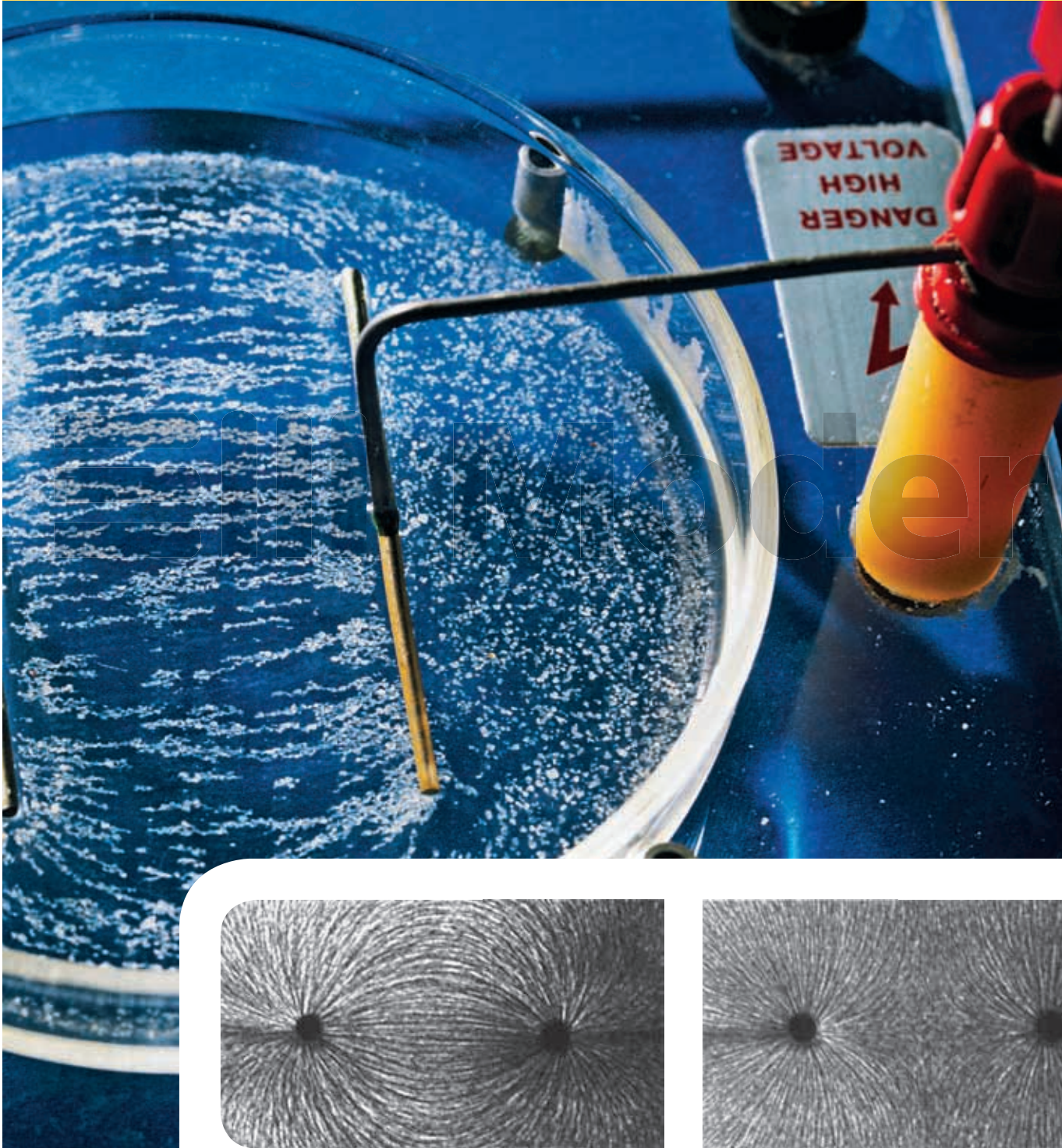
Uma carga elétrica (ou uma distribuição de cargas) origina, na região que a envolve, um campo de forças denominado campo elétrico. A cada ponto do campo associa-se uma grandeza vetorial denominada vetor campo elétrico.

2.2 Campo elétrico de cargas puntiformes

O sentido do vetor campo elétrico, devido a uma carga elétrica puntiforme, depende do sinal da carga. A intensidade do vetor campo elétrico em cada ponto depende do meio, do valor da carga que gera o campo e da distância do ponto considerado à carga. Sua direção é sempre radial.

2.3 Campo elétrico uniforme

Quando se têm placas eletrizadas com cargas elétricas de mesmo módulo e de sinais opostos, separadas por uma distância muito pequena em relação às suas dimensões, surge entre elas um campo elétrico uniforme.

As linhas de força de um campo elétrico uniforme são retas paralelas igualmente espaçadas. Caso a distância entre as placas eletrizadas não seja desprezível se comparada com as dimensões das placas, observamos o efeito de borda, onde se tem maior densidade de linhas de força e o campo não é uniforme.

Linhas de força do campo elétrico gerado por cargas elétricas de sinais opostos, à esquerda, e cargas elétricas de mesmo sinal, à direita.

Seção 2.1

Conceito de campo elétrico

Objetivos

- Compreender a noção de campo elétrico.
- Caracterizar o campo elétrico fazendo analogia com o campo gravitacional.
- Mostrar que cada ponto do campo associa-se a uma grandeza vetorial: o vetor campo elétrico.
- Relacionar força elétrica, carga de prova e vetor campo elétrico.
- Conhecer a unidade de intensidade de campo elétrico no SI.

Termos e conceitos

- campo gravitacional terrestre

Uma carga elétrica puntiforme Q fixa origina, na região que a envolve, um campo de forças chamado **campo elétrico**. Uma carga elétrica puntiforme de prova q colocada num ponto P dessa região fica sob a ação de uma força elétrica $\vec{F}_e$ (**fig. 1**). A carga elétrica q "sente" a presença da carga Q por meio do campo elétrico que Q origina. Portanto, **a força elétrica $\vec{F}_e$ é devida à interação* entre o campo elétrico da carga Q e a carga elétrica q**.

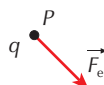



Figura 1. Campo elétrico de uma carga puntiforme Q.

Analogamente, a carga elétrica de prova q também produz um campo elétrico que age sobre Q. Assim:

> O campo elétrico desempenha o papel de transmissor de interações entre cargas elétricas.

O campo elétrico também pode ser originado por uma distribuição discreta ou contínua de cargas elétricas fixas (**fig. 2**).

A

B

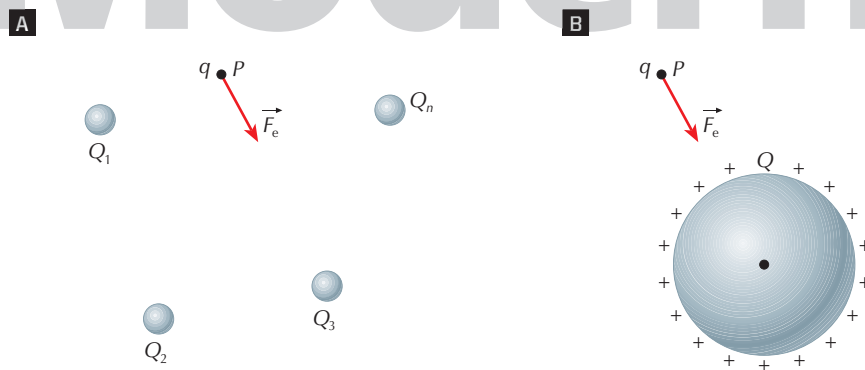



Figura 2. (A) Campo elétrico de uma distribuição de cargas elétricas. (B) Campo elétrico de uma superfície esférica uniformemente eletrizada.

Vamos caracterizar o campo elétrico fazendo analogia com o campo gravitacional terrestre.

Como se representa esquematicamente na **figura 3**, um corpo de prova de massa m, colocado num ponto P próximo da Terra (suposta estacionária), fica sujeito a uma força atrativa $\vec{P} = m\vec{g}$ (peso do corpo). Isso significa que a Terra origina, ao seu redor, o campo gravitacional que age sobre m.

* De acordo com a teoria da relatividade de Einstein, nenhuma informação pode ser transmitida com velocidade superior à velocidade de propagação da luz no vácuo. Por isso uma carga não influi direta e instantaneamente sobre a outra. O campo elétrico age como mediador da interação.

V3_P1_UN_A_CAP_02.indd 48 19.09.09 09:03:59

Na fórmula $\vec{P} = m\vec{g}$ notamos a presença de dois fatores:

a) **fator escalar** (m), que só depende do corpo sobre o qual a força se manifesta.

b) **fator vetorial** ($\vec{g}$), que exprime a ação no ponto P do responsável pelo aparecimento de tal força, no caso, a Terra. O vetor $\vec{g}$ é denominado **vetor aceleração da gravidade** ou **vetor campo gravitacional**. A cada ponto P do campo gravitacional associa-se um vetor $\vec{g}$. O módulo do vetor $\vec{g}$ é dado por $g = G\frac{M}{d^2}$, em que G é a constante de gravitação universal, M é a massa da Terra e d é a distância do centro da Terra ao ponto P.

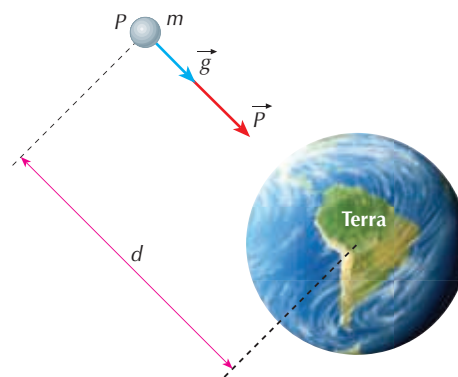



Figura 3. A Terra cria um campo gravitacional que age sobre m.

No caso do campo elétrico, a força elétrica $\vec{F}_e$ que atua em q é também expressa pelo produto de dois fatores:

a) **fator escalar**, que é análogo a m: é a carga de prova q colocada em P, na qual aparece a força elétrica $\vec{F}_e$.

b) **fator vetorial**, que depende da carga puntiforme Q ou das cargas (se o campo for produzido por uma distribuição de cargas) responsáveis pelo aparecimento da força $\vec{F}_e$ em P. Esse fator depende também do meio, como veremos posteriormente.

Esse fator vetorial análogo ao $\vec{g}$ é representado por $\vec{E}$ e é denominado **vetor campo elétrico** em P. Assim, temos:

$$\vec{F}_e = q\vec{E}$$

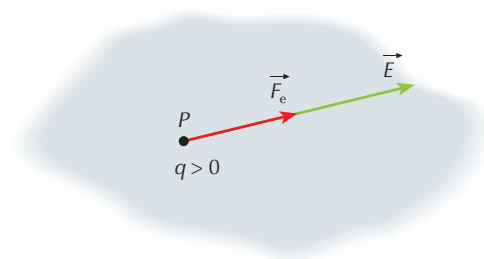
A cada ponto P de um campo elétrico associa-se um vetor $\vec{E}$, independentemente de colocarmos ou não uma carga de prova q em P.

Fato análogo verifica-se no campo gravitacional: a cada ponto desse campo associa-se um vetor $\vec{g}$, independentemente de colocarmos um corpo de prova de massa m.

Colocando-se em P uma carga de prova q, esta fica sujeita à força $\vec{F}_e = q\vec{E}$.

Da definição de produto de um número real por um vetor, podemos concluir:

- Se $q > 0$, $\vec{F}_e$ e $\vec{E}$ têm mesmo sentido.
- Se $q < 0$, $\vec{F}_e$ e $\vec{E}$ têm sentidos opostos.
- $\vec{F}_e$ e $\vec{E}$ têm sempre mesma direção.

A

B

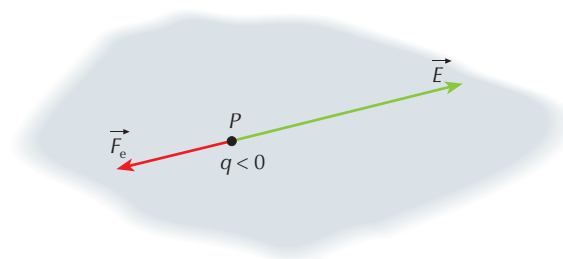



Figura 4. A carga q, colocada num ponto P de um campo elétrico, fica sujeita à força $\vec{F}_e = q\vec{E}$.

Observe que $\vec{F}_e$ e $\vec{E}$ são grandezas físicas diferentes, ainda que sejam grandezas vetoriais: $\vec{F}_e$ é força e $\vec{E}$ é vetor campo elétrico.

Unidade de intensidade de campo elétrico

De $\vec{F}_e = q\vec{E}$ (notação vetorial) vem $F_e = |q| \cdot E$ (em módulo). Portanto:

$$E = \frac{F_e}{|q|}$$

$$\text{unidade de intensidade de campo elétrico} = \frac{\text{unidade de intensidade de força}}{\text{unidade de carga}}$$

No Sistema Internacional de Unidades (SI) temos:

$$1 \text{ unidade de } E = 1 \frac{\text{newton}}{\text{coulomb}} = 1 \frac{\text{N}}{\text{C}}$$

Conforme veremos no capítulo 3, o nome oficial da unidade de intensidade de campo no Sistema Internacional de Unidades (SI) é o volt por metro (V/m).

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

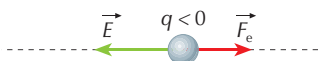
R. 14 Num ponto de um campo elétrico, o vetor campo elétrico tem direção horizontal, sentido da direita para a esquerda e intensidade 10^5 N/C. Coloca-se, nesse ponto, uma carga puntiforme de -2 μC. Determine a intensidade, a direção e o sentido da força que atua na carga.

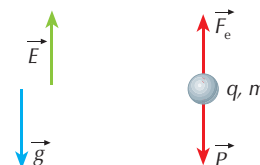
Solução:
A força $\vec{F}_e$ que atua na carga tem:
intensidade:

$$F_e = |q| \cdot E \Rightarrow F_e = 2 \cdot 10^{-6} \cdot 10^5 \Rightarrow \boxed{F_e = 0{,}2 \text{ N}}$$

direção: horizontal (mesma de $\vec{E}$)
sentido: da esquerda para a direita (oposto ao de $\vec{E}$, pois $q < 0$).

Resposta: A força elétrica que atua em q tem intensidade 0,2 N, direção horizontal e sentido da esquerda para a direita.

$\vec{E}$ $q < 0$ $\vec{F}_e$

R. 15 Uma partícula de massa m e carga q foi colocada num ponto A de um campo elétrico onde o vetor campo elétrico é vertical ascendente e tem intensidade E. Sendo dados E, m e g (aceleração da gravidade), determine q, sabendo que em A a partícula fica em equilíbrio.

Solução:
Na partícula atuam o peso (ação gravitacional) e a força elétrica. Sendo o peso vertical, descendente, resulta que a força elétrica deve ser vertical, ascendente. Isso significa que q é positivo, pois a força elétrica tem o mesmo sentido do campo.
Além de mesma direção e sentidos opostos, as forças $\vec{F}_e$ e $\vec{P}$ devem ter a mesma intensidade: $F_e = P$

Como $F_e = qE$ e $P = mg$, temos que:

$$qE = mg \Rightarrow \boxed{q = \frac{mg}{E}}$$

Resposta: $q = \dfrac{mg}{E}$

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

P. 23 Uma carga elétrica puntiforme de 10^{-9} C, ao ser colocada num ponto P de um campo elétrico, fica sujeita a uma força de intensidade igual a 10^{-2} N, vertical e descendente. Determine:

a) a intensidade, a direção e o sentido do vetor campo elétrico em P;

b) a intensidade, a direção e o sentido da força que atuaria sobre uma carga puntiforme igual a 3 μC, se ela fosse colocada em P.

P. 24 Num ponto de um campo elétrico, o vetor campo elétrico tem direção vertical, sentido para baixo e intensidade igual a $5 \cdot 10^3$ N/C. Coloca-se, nesse ponto, uma pequena esfera de peso $2 \cdot 10^{-3}$ N e eletrizada com carga desconhecida. Sabendo que a pequena esfera fica em equilíbrio, determine:

a) a intensidade, a direção e o sentido da força elétrica que atua na carga;

b) o valor da carga.

Campo elétrico de cargas puntiformes

❯ Objetivos

- Analisar as características do vetor campo elétrico gerado por uma carga elétrica puntiforme, considerando-a positiva e negativa.
- Conhecer o vetor campo elétrico resultante da ação de várias cargas elétricas puntiformes.
- Analisar as linhas de força geradas por cargas positivas e negativas.

❯ Termos e conceitos

- **linhas de força**

1 Campo elétrico de uma carga puntiforme *Q* fixa

Determinemos as características do vetor campo elétrico $\vec{E}$ num ponto *P*, devido a uma carga puntiforme *Q*, fixa em *O* e no vácuo (**fig. 5**).

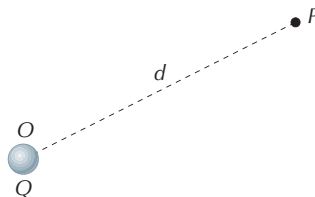



Figura 5. *Q* fixo em *O* gera no espaço que o envolve um campo elétrico. A cada ponto associa-se um vetor $\vec{E}$.

Intensidade

Coloquemos em *P* uma carga puntiforme de prova *q* (**fig. 6**). Esta fica sujeita a uma força de intensidade: $F_e = |q| \cdot E$ ①

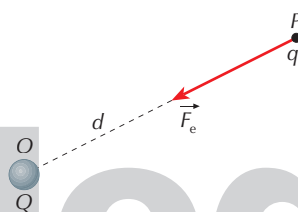



Figura 6. A carga elétrica *q* colocada em *P* fica sujeita a uma força $\vec{F}_e = q\vec{E}$.

Da lei de Coulomb vem: $F_e = k_0 \cdot \dfrac{|Q| \cdot |q|}{d^2}$ ②

Portanto: $|q| \cdot E = k_0 \cdot \dfrac{|Q| \cdot |q|}{d^2} \Rightarrow \boxed{E = k_0 \cdot \dfrac{Q}{d^2}}$

O gráfico de *E*, em função de *d*, é mostrado na **figura 7**. Observe que a intensidade do campo *E* é inversamente proporcional ao quadrado da distância *d* à carga. Assim, se *d* dobra, *E* reduz-se à quarta parte; se *d* triplica, *E* reduz a $\frac{1}{9}$ do valor inicial.

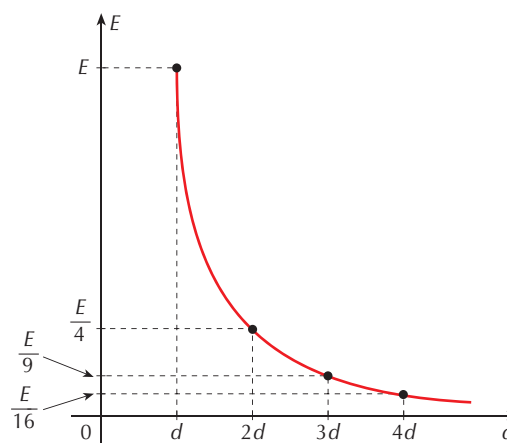



Figura 7. Gráfico de $E \times d$.

Direção

A mesma da força $\vec{F}_e$, isto é, da reta que passa pelos pontos O e P.

Sentido

Analisemos os dois casos a seguir.

1º caso: $Q > 0$

Coloquemos em P a carga pontual $q > 0$. Nessas condições, $Q > 0$ e $q > 0$ se repelem (**fig. 8A**). Como $q > 0$, segue-se que $\vec{E}$ em P tem o mesmo sentido de $\vec{F}_e$, isto é, de O para P (**fig. 8B**).

Figura 8.

Colocando-se em P uma carga pontual $q < 0$, temos: $Q > 0$ e $q < 0$ se atraem (**fig. 9A**). Como $q < 0$, segue-se que $\vec{E}$ em P tem sentido oposto ao de $\vec{F}_e$, isto é, de O para P (**fig. 9B**). Observando as duas situações, vemos que, sendo $Q > 0$, o sentido do vetor campo elétrico $\vec{E}$ em P é de O para P, qualquer que seja o sinal da carga de prova.

Figura 9.

O vetor campo elétrico $\vec{E}$, produzido em cada ponto por uma carga $Q > 0$ fixa, é de afastamento.

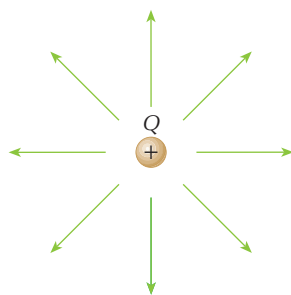
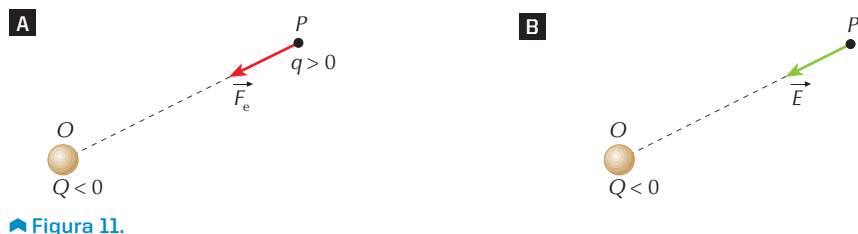



Figura 10. Vetores campo elétrico produzidos por $Q > 0$ fixa.

2º caso: $Q < 0$

Seja $q > 0$ colocada em P. Nestas condições, $Q < 0$ e $q > 0$ se atraem (**fig. 11A**). Como $q > 0$, segue-se que $\vec{E}$ em P tem o mesmo sentido de $\vec{F}_e$, isto é, de P para O (**fig. 11B**).

Figura 11.

V3_P1_UN_A_CAP_02.indd 52 19.09.09 09:04:04

Colocando-se em P uma carga $q < 0$, temos: $Q < 0$ e $q < 0$ se repelem (**fig. 12A**). Como $q < 0$, segue-se que $\vec{E}$ em P tem sentido oposto ao de $\vec{F}_e$, isto é, de P para O (**fig. 12B**). Observe agora que, sendo $Q < 0$, o sentido do vetor campo elétrico $\vec{E}$ em P é de P para O.

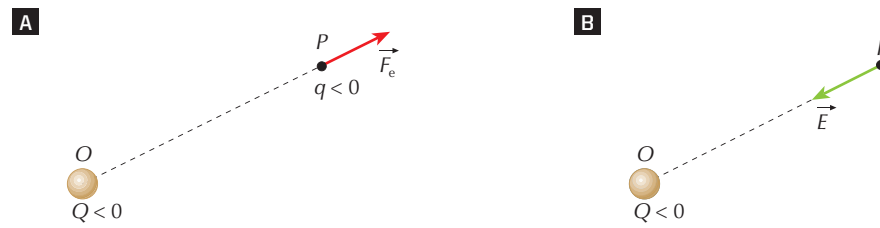



Figura 12.

O vetor campo elétrico $\vec{E}$, produzido em cada ponto por uma carga $Q < 0$ fixa, é de aproximação.

Q

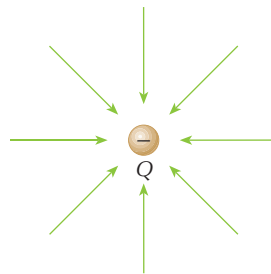
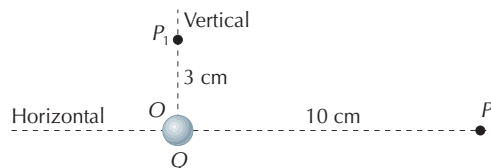



Figura 13. Vetores campo elétrico produzidos por $Q < 0$ fixa.

R. 16 Determine a intensidade, a direção e o sentido do vetor campo elétrico nos pontos P_1 e P_2 indicados na figura. O campo elétrico é gerado pela carga puntiforme $Q = 1\ \mu C$ e o meio é o vácuo, cuja constante eletrostática é $k_0 = 9 \cdot 10^9\ \frac{N \cdot m}{C^2}$

Determine, em seguida, a intensidade da força elétrica que atua em $q = 10^{-7}$ C quando colocada em P_1.

Solução:

O vetor campo $\vec{E}_1$ em P_1 tem as seguintes características:

intensidade: A intensidade do campo elétrico no ponto P_1 originado pela carga puntiforme Q fixa é dada por:

$$E_1 = k_0 \cdot \frac{|Q|}{d^2}$$

Sendo $d_1 = 3$ cm $= 3 \cdot 10^{-2}$ m, $Q = 1\mu C = 10^{-6}$ C e $k_0 = 9 \cdot 10^9\ \frac{N \cdot m^2}{C^2}$, temos:

$$E_1 = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{10^{-6}}{(3 \cdot 10^{-2})^2} \Rightarrow \boxed{E_1 = 10^7\ N/C}$$

direção: vertical, isto é, da reta $\overleftrightarrow{OP_1}$

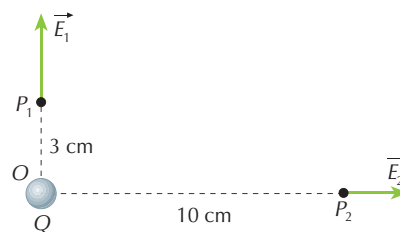
sentido: para cima, pois $Q > 0$ origina campo de afastamento

O vetor campo $\vec{E}_2$ em P_2 tem as seguintes características:

intensidade: $E_2 = k_0 \cdot \frac{|Q|}{d^2}$

Sendo, agora, $d_2 = 10\ cm = 10^{-1}\ m$, temos:

$$E_2 = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{10^{-6}}{(10^{-1})^2} \Rightarrow \boxed{E_2 = 9 \cdot 10^5\ N/C}$$

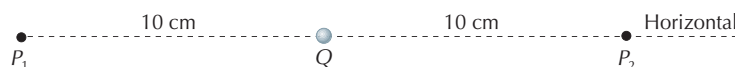
direção: horizontal
sentido: da esquerda para a direita

A intensidade da força elétrica que atua em $q = 10^{-7}$ C colocada em P_1 é dada por:

$$F_{e(1)} = qE_1 \Rightarrow F_{e(1)} = 10^{-7} \cdot 10^7 \Rightarrow \boxed{F_{e(1)} = 1\ N}$$

Resposta: $E_1 = 10^7$ N/C, vertical, para cima; $E_2 = 9 \cdot 10^5$ N/C, horizontal, para a direita e $F_{e(1)} = 1$ N

EXERCÍCIO PROPOSTO

P. 25 Determine a intensidade, a direção e o sentido do vetor campo elétrico nos pontos P_1 e P_2 da figura.

O campo elétrico é gerado pela carga puntiforme $Q = 10^{-5}$ C e o meio é o vácuo $\left(k_0 = 9 \cdot 10^9 \frac{N \cdot m}{C^2}\right)$

Determine, em seguida, a intensidade, a direção e o sentido da força elétrica que atua em $q = 1\ \mu C$, colocada em P_1. Como se modificaria a resposta anterior se q valesse $-1\ \mu C$?

2 Campo elétrico de várias cargas puntiformes fixas

Consideremos diversas cargas puntiformes fixas $Q_1, Q_2, ..., Q_n$ e determinemos o vetor campo elétrico originado por essas cargas num ponto P qualquer do campo (**fig. 14**).

Se Q_1 estivesse sozinha, originaria em P o vetor campo $\vec{E}_1$, bem como Q_2, sozinha, originaria em P o vetor campo $\vec{E}_2$ e assim por diante, até Q_n que, sozinha, originaria em P o vetor campo $\vec{E}_n$.

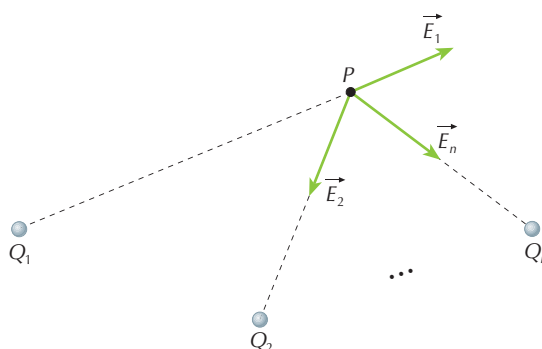



Figura 14.

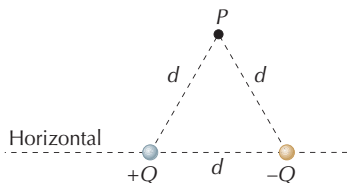
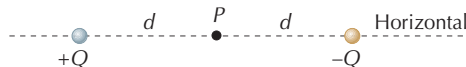
O **princípio da superposição dos campos elétricos** estabelece que:

O vetor campo elétrico resultante $\vec{E}_R$ em P, devido a várias cargas $Q_1, Q_2, ..., Q_n$, é dado pela soma vetorial $\vec{E}_1, \vec{E}_2, ..., \vec{E}_n$, em que cada vetor parcial é determinado como se a carga correspondente estivesse sozinha.

$$\vec{E}_R = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + ... + \vec{E}_n$$

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

R. 17 Determine a intensidade, a direção e o sentido do vetor campo elétrico resultante em P nos casos **a** e **b** indicados. Admita, em cada caso, que $Q = 10^{-6}$ C e $d = 0{,}3$ m. O meio é o vácuo $\left(k_0 = 9 \cdot 10^9 \frac{N \cdot m^2}{C^2}\right)$.

a)

b)

Solução:

a) A carga $+Q$ origina, em P, um vetor campo de afastamento: $\vec{E}_1$.
A carga $-Q$ origina, em P, um vetor campo de aproximação: $\vec{E}_2$.
O vetor campo resultante $\vec{E}_R$, obtido pela regra do paralelogramo, tem as seguintes características:
intensidade: os vetores campo $\vec{E}_1$ e $\vec{E}_2$ têm mesma intensidade, pois P dista igualmente de $+Q$ e de $-Q$:

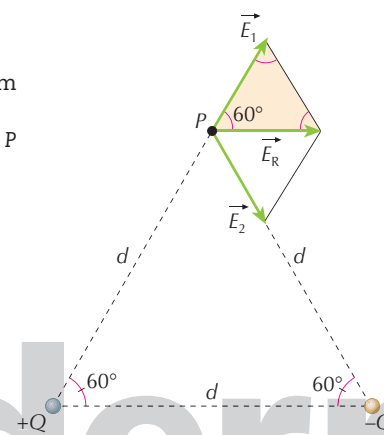
$$E_1 = E_2 = k_0 \cdot \frac{|Q|}{d^2}$$

Sendo $k_0 = 9 \cdot 10^9 \frac{N \cdot m^2}{C^2}$, $Q = 10^{-6}$ C e $d = 0{,}3$ m, temos que:

$$E_1 = E_2 = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{10^{-6}}{(0{,}3)^2} \Rightarrow E_1 = E_2 = 10^5 \text{ N/C}$$

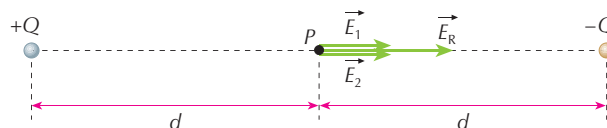
Observe que o triângulo colorido é equilátero. Isso significa que:

$$\boxed{E_R = 10^5 \text{ N/C}}$$

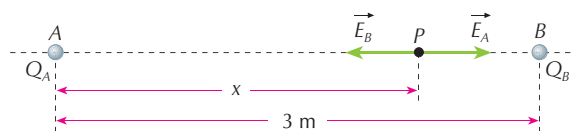
direção: horizontal
sentido: da esquerda para a direita

b) A carga $+Q$ origina, em P, um vetor campo de afastamento $\vec{E}_1$.
A carga $-Q$ origina, em P, um vetor campo de aproximação $\vec{E}_2$.
O vetor campo resultante $\vec{E}_R$ tem as seguintes características:

intensidade: analogamente ao caso anterior, os vetores campo $\vec{E}_1$ e $\vec{E}_2$ têm a mesma intensidade:

$$E_R = E_1 + E_2 \Rightarrow E_R = 10^5 + 10^5 \Rightarrow \boxed{E_R = 2 \cdot 10^5 \text{ N/C}}$$

direção: horizontal
sentido: da esquerda para a direita

Resposta: a) 10^5 N/C, horizontal, e da esquerda para a direita; b) $2 \cdot 10^5$ N/C, horizontal, da esquerda para a direita

R. 18 Nos pontos A e B, separados pela distância $AB = 3$ m, fixam-se cargas elétricas puntiformes $Q_A = 8$ μC e $Q_B = 2$ μC respectivamente. Determine um ponto onde o vetor campo elétrico resultante é nulo.

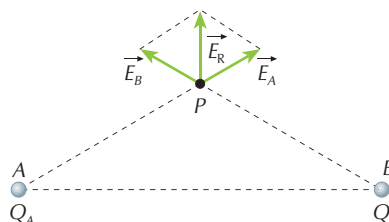
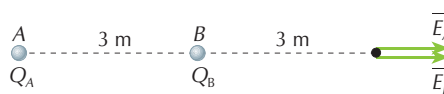
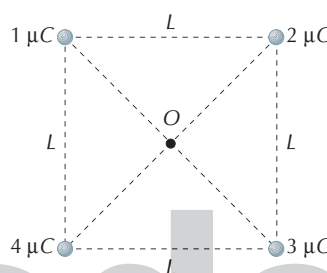
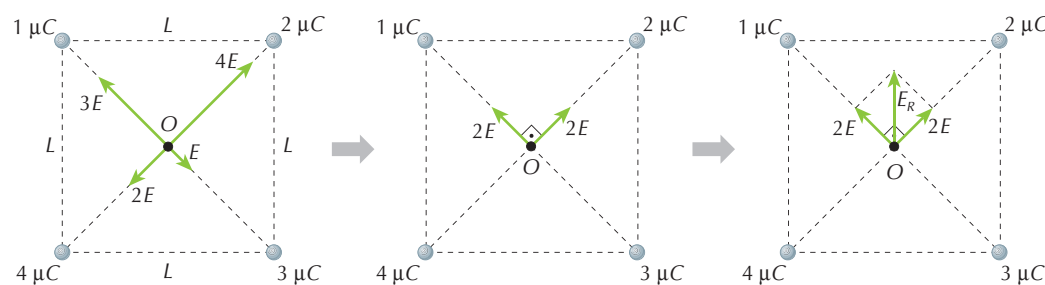
Solução:
O ponto P, onde o vetor campo resultante é nulo, está entre A e B e mais próximo de B (carga menor).
A carga Q_A produz, em P, um vetor campo de afastamento $\vec{E}_A$.
A carga Q_B produz, em P, um vetor campo de afastamento $\vec{E}_B$.

$\vec{E}_A$ e $\vec{E}_B$ devem ter mesma direção, sentidos opostos e mesma intensidade:

$$E_A = E_B \Rightarrow k_0 \cdot \frac{|Q_A|}{x^2} = k_0 \cdot \frac{|Q_B|}{(3 - x^2)} \Rightarrow \frac{8}{x^2} = \frac{2}{(3 - x)^2} \Rightarrow \frac{4}{x^2} = \frac{1}{(3 - x)^2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow x^2 - 8x + 12 = 0 \Rightarrow \boxed{x = 2 \text{ m}} \text{ ou } x = 6 \text{ m}$$

A resposta x = 6 m é inadequada. A 6 m do ponto A, embora os vetores $\vec{E}_A$ e $\vec{E}_B$ tenham mesma intensidade, têm também mesmo sentido.

Resposta: ponto P a 2 m de A

Observação:
Observe que fora da reta $\overleftrightarrow{AB}$ não existem pontos onde o vetor campo elétrico é nulo; em P, o vetor campo resultante é $\vec{E}_R \neq \vec{0}$.

R. 19 Nos vértices de um quadrado fixam-se cargas elétricas puntiformes de valores 1 μC, 2 μC, 3 μC e 4 μC, conforme a figura. Qual a intensidade do vetor campo elétrico resultante no centro O do quadrado? O meio é o vácuo e o quadrado tem lado L = 0,6 m. É dado $k_0 = 9 \cdot 10^9 \frac{N \cdot m^2}{C^2}$.

Solução:
As cargas elétricas são positivas e originam no centro O vetores campo de afastamento. Chamando de E a intensidade do vetor campo elétrico que a carga de 1 μC origina no centro O, as cargas elétricas de 2 μC, 3 μC e 4 μC originam em O vetores campo elétrico de intensidades 2E, 3E e 4E, respectivamente. Assim, temos:

O vetor campo elétrico resultante em O tem intensidade $E_R = 2\sqrt{2} \cdot E$.

Sendo $E = k_0 \cdot \frac{|Q|}{d^2}$, em que:

$k_0 = 9 \cdot 10^9 \frac{N \cdot m^2}{C^2}$

$Q = 1 \ \mu C = 10^{-6}$ C

$d = \frac{L\sqrt{2}}{2} = \frac{0{,}6\sqrt{2}}{2} \Rightarrow d = 0{,}3\sqrt{2}$ m (metade da medida da diagonal)

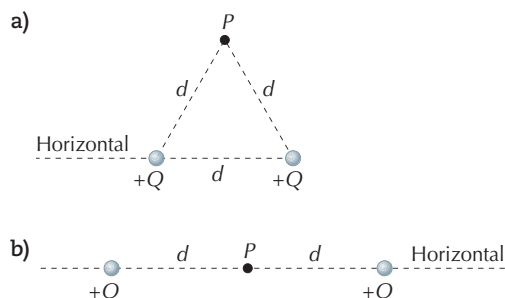
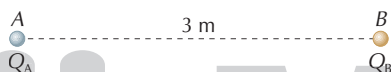
Temos: $E = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{10^{-6}}{(0{,}3 \cdot \sqrt{2})^2} \Rightarrow E = 5 \cdot 10^4$ N/C

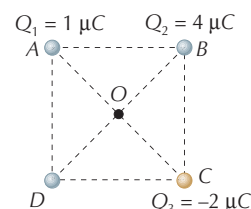
Portanto: $E_R = 2\sqrt{2} \cdot E \Rightarrow E_R = 2\sqrt{2} \cdot 5 \cdot 10^4 \Rightarrow E_R = \sqrt{2} \cdot 10^5 \Rightarrow \boxed{E_R \simeq 1{,}4 \cdot 10^5 \text{ N/C}}$

Resposta: $\simeq 1{,}4 \cdot 10^5$ N/C

P. 26 Determine a intensidade, a direção e o sentido do vetor campo elétrico resultante em P nos casos **a** e **b** indicados. Admita em cada caso que $Q = 10^{-6}$ C e $d = 0{,}3$ m. O meio é o vácuo, cuja constante eletrostática é $k_0 = 9 \cdot 10^9 \dfrac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}$.

a) P, d, d, Horizontal, $+Q$, d, $+Q$

b)

P. 27 Nos pontos A e B separados pela distância $AB = 3$ m, fixam-se cargas elétricas puntiformes $Q_A = 8$ μC e $Q_B = -2$ μC, respectivamente. Determine um ponto onde o vetor campo elétrico resultante é nulo.

P. 28 Em três vértices, A, B e C, de um quadrado de lado igual a $\sqrt{2}$ m colocam-se cargas elétricas puntiformes, conforme a figura abaixo. Sendo o meio o vácuo, determine a intensidade do vetor campo elétrico resultante no centro do quadrado. É possível colocar uma carga elétrica puntiforme em D, de modo que o vetor campo elétrico resultante no ponto O seja nulo?

Adote $k_0 = 9 \cdot 10^9 \dfrac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}$.

P. 29 Nos vértices de um hexágono regular fixam-se cargas elétricas puntiformes de valores 1 μC, 2 μC, 3 μC, 4 μC, 5 μC e 6 μC, nessa ordem. Qual a intensidade do vetor campo elétrico no centro do hexágono? O meio é o vácuo e o hexágono tem lado $L = 30$ cm. É dado $k_0 = 9 \cdot 10^9 \dfrac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}$.

3 Linhas de força

A cada ponto de um campo elétrico associa-se um vetor $\vec{E}$.

A representação gráfica de um campo elétrico é feita desenhando-se um número conveniente de vetores $\vec{E}$, conforme indicado na **figura 15**.

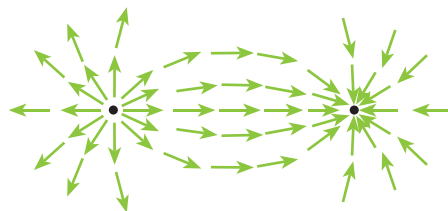



Figura 15. Vetores campo produzidos por duas cargas puntiformes de sinais opostos.

Outra maneira de representar graficamente um campo elétrico consiste em utilizar as **linhas de força**.

> Linhas de força são linhas tangentes ao vetor campo elétrico em cada um dos seus pontos. Elas são orientadas no sentido do vetor campo.

A $\vec{E}_1$, $\vec{E}_2$, $\vec{E}_3$, P_1, P_2, P_3

B

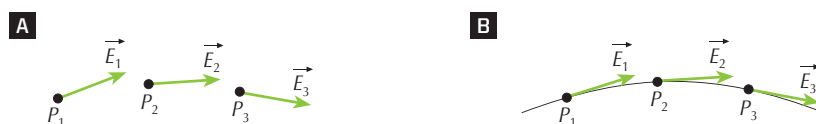



Figura 16. (A) A cada ponto do campo associa-se um vetor $\vec{E}$; (B) a linha de força é tangente ao vetor campo elétrico em cada um de seus pontos.

O desenho das linhas de força numa determinada região nos dá ideia de como variam, aproximadamente, a direção e o sentido do vetor $\vec{E}$ na região considerada.

As figuras a seguir mostram linhas de força de alguns campos elétricos particulares:

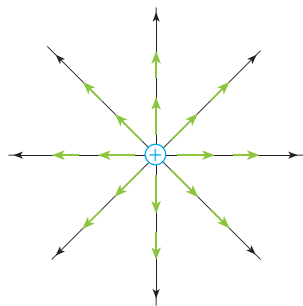



Figura 17. **Carga puntiforme $Q > 0$. As linhas de força partem das cargas positivas.**

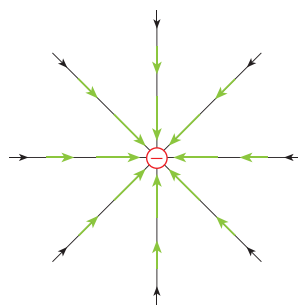



Figura 18. **Carga puntiforme $Q < 0$. As linhas de força chegam nas cargas negativas.**

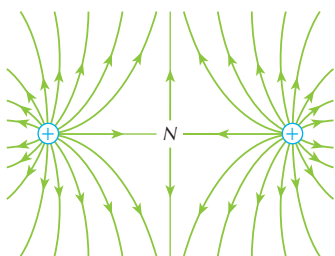



Figura 19. **Duas cargas puntiformes de mesmo módulo e positivas. Em *N*, o vetor campo elétrico é nulo.**

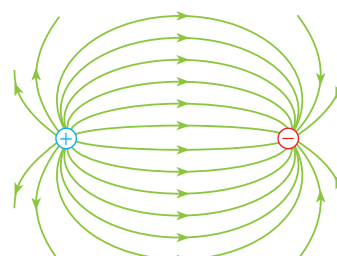



Figura 20. **Duas cargas puntiformes de mesmo módulo e de sinais opostos.**

Quando tivermos duas cargas puntiformes de sinais opostos e módulos diferentes, da carga de maior módulo parte (se a carga for positiva) ou chega (se a carga for negativa) um número maior de linhas de força. Como exemplo disso, observemos na **figura 21** que a carga positiva é a que possui maior módulo.

Nas regiões em que as linhas estão mais próximas, ou seja, a concentração de linhas de força é maior, o campo é mais intenso. Assim, no ponto *A* o vetor campo elétrico é mais intenso do que em *B*. Já em *N*, o vetor campo elétrico é nulo.

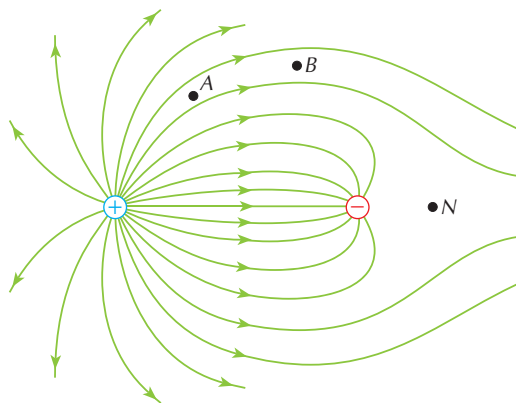



Figura 21. **Duas cargas puntiformes de sinais opostos e módulos diferentes.**

Entre na rede No endereço eletrônico http://www.dee.ufrj.br/eletromag01/index.htm (acesso em julho/2009), em 6.2 – linhas de campo elétrico, você pode visualizar as linhas de força do campo elétrico originado por duas cargas elétricas, variando-se o sinal e o valor de uma das cargas.

Campo elétrico uniforme

Objetivo

- Compreender o conceito de campo elétrico uniforme.

Termos e conceitos

- **efeito de borda entre as placas**

Campo elétrico uniforme é aquele em que o vetor $\vec{E}$ é o mesmo em todos os pontos. Assim, em cada ponto do campo, **o vetor** $\vec{E}$ tem a **mesma intensidade**, a **mesma direção** e o **mesmo sentido**.

As linhas de força de um campo elétrico uniforme são **retas paralelas igualmente espaçadas e todas com o mesmo sentido** (fig. 22).

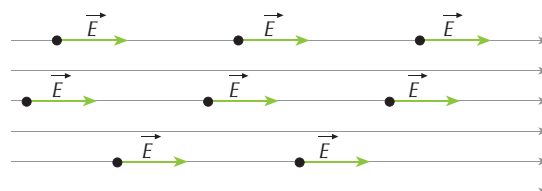



Figura 22. Linhas de força de um campo uniforme.

Tem-se um campo elétrico praticamente uniforme entre duas placas eletrizadas com cargas elétricas de sinais opostos (**fig. 23**). Para que isso ocorra, a distância entre as placas deve ser muito pequena, quando comparada com suas dimensões.

Quando a distância entre as placas não for desprezível, quando comparada com suas dimensões, o campo elétrico é praticamente uniforme na região central entre as placas e não é uniforme próximo às bordas. Este efeito é conhecido como **efeito de borda** (fig. 24).

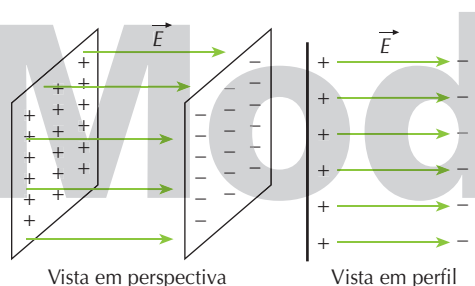



Figura 23. Campo elétrico uniforme entre duas placas eletrizadas.

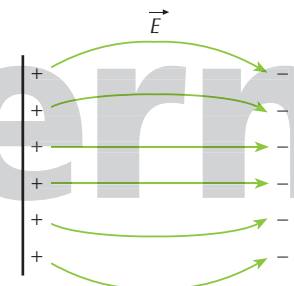



Figura 24. O campo elétrico é uniforme na região central entre as placas.

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

R. 20 Uma carga elétrica puntiforme $q = 1\ \mu C$ e de massa $m = 10^{-6}$ kg é abandonada, em repouso, num ponto A de um campo elétrico uniforme de intensidade $E = 10^5$ N/C, conforme a figura.

Determine:

a) a intensidade da força elétrica que atua em q;

b) a aceleração do movimento de q;

c) a velocidade que q possui ao passar por B, situado a 0,2 m de A.

Despreze as ações gravitacionais.

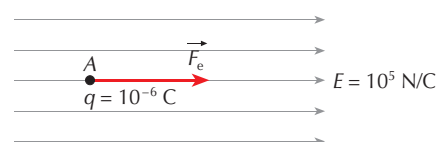
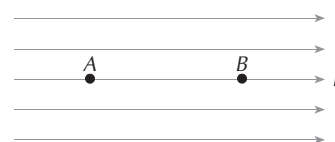
Solução:

a) Sendo $q > 0$ resulta que $\vec{F}_e$ tem mesmo sentido que $\vec{E}$. A intensidade da força elétrica em q é dada por:

$$F_e = |q| \cdot E$$

Sendo $q = 1\ \mu C = 10^{-6}$ C e $E = 10^5$ N/C, temos:

$$F_e = 10^{-6} \cdot 10^5 \Rightarrow \boxed{F_e = 10^{-1}\ \text{N}}$$

V3_P1_UN_A_CAP_02.indd 59 19.09.09 09:04:12

b) Pela equação fundamental da Dinâmica, $F_e = ma$, sendo $Fe = 10^{-1}$ N e $m = 10^{-6}$ kg, temos:

$$10^{-1} = 10^{-6} \cdot a \Rightarrow \boxed{a = 10^5 \text{ m/s}^2}$$

Observe que, sendo o campo uniforme ($\vec{E}$ é constante), resulta que $\vec{F}_e$ é constante. Portanto, a partícula abandonada em repouso executa movimento retilíneo uniformemente variado e, no caso, acelerado. Se a partícula fosse lançada na direção do campo, mas em sentido contrário, o movimento inicial seria retilíneo, uniformemente variado e retardado.

c) Sendo o movimento uniformemente variado, podemos aplicar a equação de Torricelli:

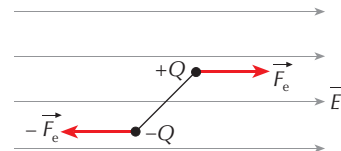
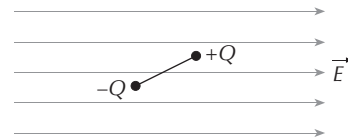
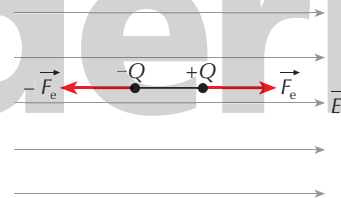
$$v_B^2 = v_A^2 + 2a\Delta s \Rightarrow v_B^2 = 0 + 2 \cdot 10^5 \cdot 0{,}2 \Rightarrow \boxed{v_B = 2 \cdot 10^2 \text{ m/s}}$$

Resposta: a) 10^{-1} N; b) 10^5 m/s²; c) $2 \cdot 10^2$ m/s

R. 21 Considere um sistema constituído por duas cargas elétricas puntiformes de mesmo valor absoluto e de sinais opostos, situadas nos extremos de uma pequena haste isolante e rígida. Tal sistema constitui um **dipolo elétrico**. O dipolo é colocado num campo elétrico uniforme, conforme mostra a figura ao lado.

Como seria a posição de equilíbrio estável do dipolo no interior do campo? Despreze ações gravitacionais.

Solução:

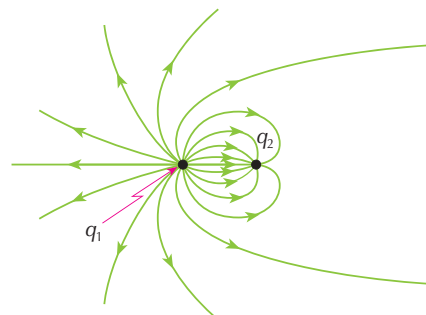
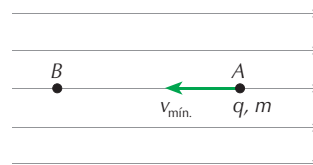
Sobre as cargas elétricas puntiformes $+Q$ e $-Q$ o campo elétrico exerce forças, respectivamente, no mesmo sentido e em sentido oposto ao de $\vec{E}$.

Sob a ação desse sistema de forças, o dipolo tende a se orientar na **direção do vetor campo elétrico** $\vec{E}$, com a carga elétrica positiva $+Q$ no sentido de $\vec{E}$.

Essa é a posição de equilíbrio estável. Note que, girando ligeiramente o dipolo, ele tende a retornar à posição de equilíbrio.

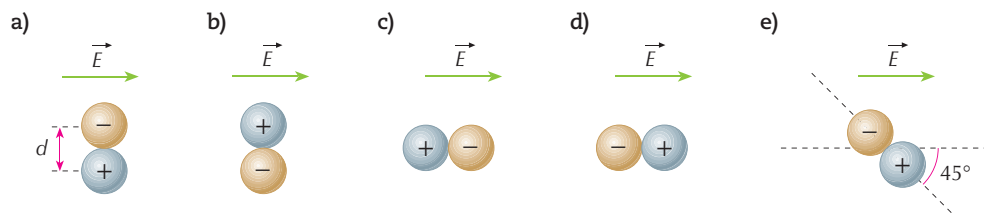
Conteúdo digital Moderna PLUS http://www.modernaplus.com.br
Animação: *Campo elétrico*

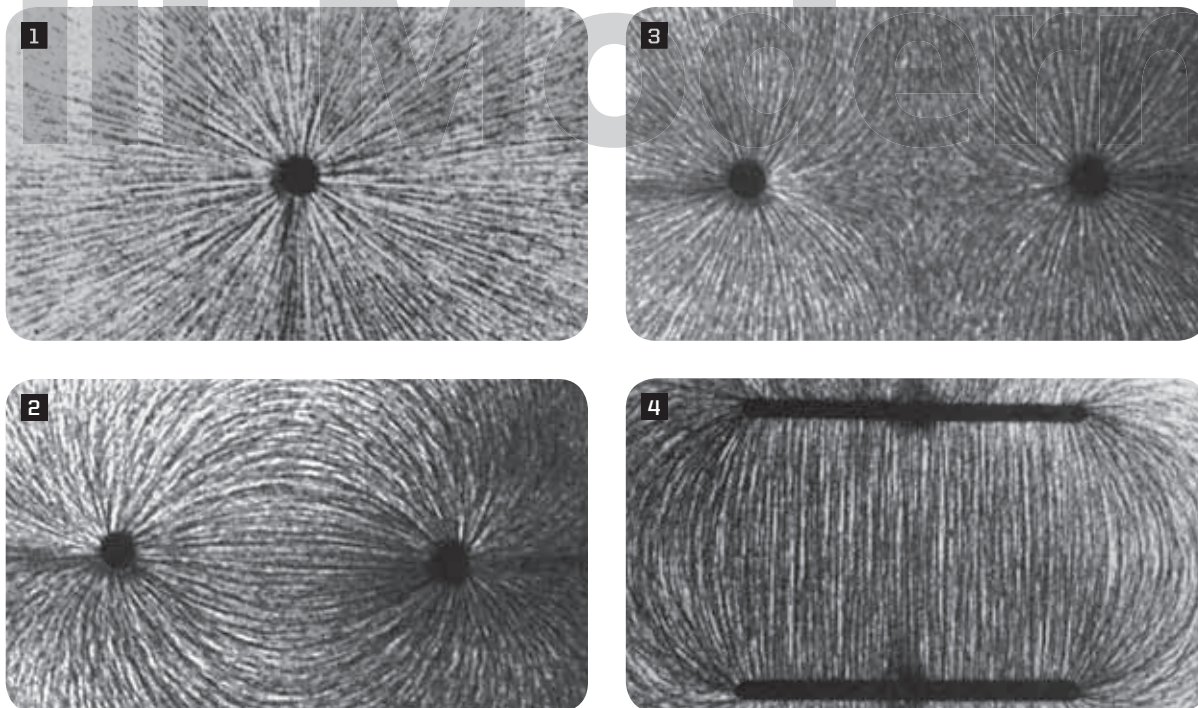
EXERCÍCIOS PROPOSTOS

P. 30 (Unicamp-SP) A figura mostra as linhas de força do campo eletrostático criado por um sistema de duas cargas puntiformes q_1 e q_2.

a) Nas proximidades de que carga o campo eletrostático é mais intenso? Por quê?

b) Qual é o sinal do produto $q_1 \cdot q_2$?

P. 31 Qual a mínima velocidade com que uma carga $q = 0,1\ \mu C$ de massa $m = 10^{-7}$ kg deve ser lançada de um ponto A, na direção e sentido contrário às linhas de força de um campo elétrico uniforme de intensidade $E = 10^5$ N/C, para que atinja B, situado a 0,2 m de A? Despreze as ações gravitacionais.

P. 32 (Unicamp-SP) Uma molécula diatômica tem átomos com carga $+q$ e $-q$. A distância entre os centros dos átomos é d. A molécula está numa região onde existe um campo elétrico uniforme $\vec{E}$. Descubra em qual das seguintes posições a molécula estará em equilíbrio estável. Justique.

a) b) c) d) e)

As fotos das linhas de força

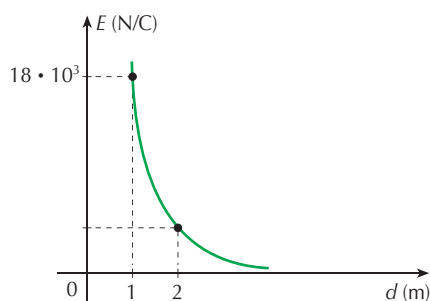
Nas fotos, apresentamos as linhas de força dos campos elétricos originados por uma carga elétrica puntiforme isolada (1), por duas cargas puntiformes de mesmo módulo e sinais contrários (2), por duas cargas puntiformes de mesmo módulo e de mesmo sinal (3), e por duas placas eletrizadas (4). Observe que na região central entre as placas o campo elétrico é praticamente uniforme.

As fotos foram obtidas com fiapos de tecidos suspensos em óleo. Em cada foto, nas extremidades dos fiapos, surgem cargas elétricas de sinais opostos devido à ação da carga ou das cargas que originam o campo elétrico. Cada fiapo torna-se um dipolo e se orienta na direção do vetor campo elétrico (ver exercício resolvido **R.21**). Desse modo, as linhas definidas pelos fiapos são as linhas de força.

EXERCÍCIOS PROPOSTOS DE RECAPITULAÇÃO

P. 33 (Efoa-MG) Uma partícula de carga elétrica $q = 3 \cdot 10^{-8}$ C, colocada num ponto P localizado a 3 m de uma carga Q, no vácuo, sofre a ação de uma força de módulo $F_e = 1{,}5 \cdot 10^{-2}$ N. Sendo a constante eletrostática do vácuo $k_0 = 9 \cdot 10^9 \frac{N \cdot m^2}{C^2}$, responda:

a) Qual o módulo do campo elétrico em P?

b) Admitindo-se que esse campo elétrico se deve exclusivamente a Q, qual o valor de Q?

P. 34 O gráfico abaixo representa a variação da intensidade do campo gerado por uma carga Q puntiforme, positiva, em função da distância à carga.

Admitindo-se que o meio seja o vácuo $\left(k_0 = 9 \cdot 10^9 \frac{N \cdot m^2}{C^2}\right)$, determine:

a) o valor da carga Q;

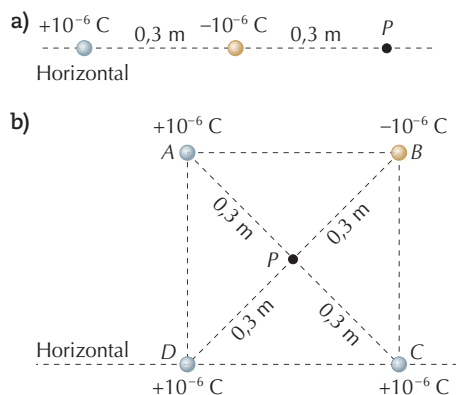
b) a intensidade da força elétrica que atua em $q = -10^{-5}$ C, colocada a 2 m de Q;

c) a intensidade da força elétrica que atua em $q = 10^{-5}$ C, colocada a 1 m de Q.

P. 35 Determine a intensidade, a direção e o sentido do vetor campo elétrico resultante em P nos casos **a** e **b** indicados. O meio é o vácuo $\left(k_0 = 9 \cdot 10^9 \frac{N \cdot m^2}{C^2}\right)$.

a) $+10^{-6}$ C — 0,3 m — -10^{-6} C — 0,3 m — P

Horizontal

b)

P. 36 (Fuvest-SP) Uma pequena esfera, com carga elétrica positiva $Q = 1{,}5 \cdot 10^{-9}$ C, está a uma altura $D = 0{,}05$ m acima da superfície de uma grande placa condutora, ligada à Terra, induzindo sobre essa superfície cargas negativas, como na **figura I**. O conjunto dessas cargas estabelece um campo elétrico que é idêntico, apenas na parte do espaço acima da placa, ao campo gerado por uma carga +Q e uma carga −Q, como se fosse uma "imagem" de Q que estivesse colocada na posição representada na **figura II**.

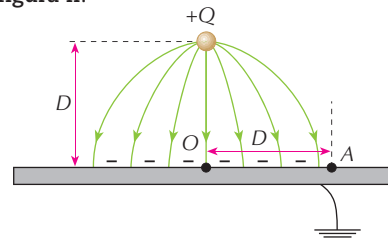



Figura I.

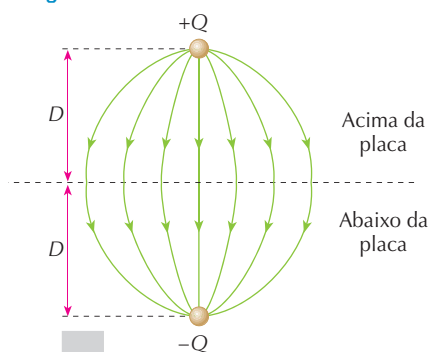
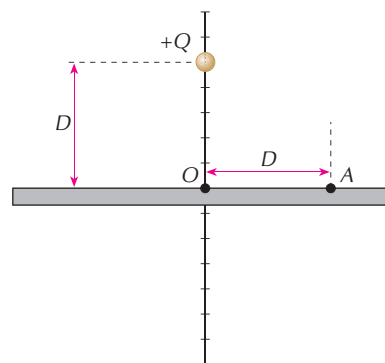



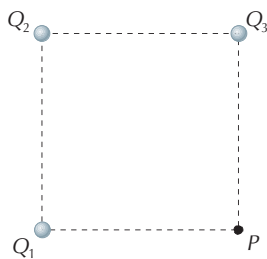
Figura II.

a) Determine a intensidade da força F, em N, que age sobre a carga +Q, devida às cargas induzidas na placa.

b) Determine a intensidade do campo elétrico E_0, em V/m, que as cargas negativas induzidas na placa criam no ponto onde se encontra a carga +Q.

c) Represente, no diagrama abaixo, no ponto A, os vetores campo elétrico $\vec{E}_1$ e $\vec{E}_2$, causados, respectivamente, pela carga +Q e pelas cargas induzidas na placa, bem como o campo resultante, $\vec{E}_A$. O ponto A está a uma distância D do ponto O da figura e muito próximo à placa, mas acima dela.

d) Determine a intensidade do campo elétrico resultante $\vec{E}_A$, em V/m, no ponto A.

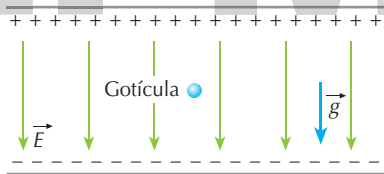
> Note e adote:
> $F = \frac{k \cdot Q_1 \cdot Q_2}{r^2}$; $E = \frac{k \cdot Q}{r^2}$,
> onde $k = 9 \cdot 10^9$ N · m²/C²; 1 V/m = 1 N/C

P. 37 A figura mostra três cargas elétricas puntiformes Q_1, Q_2 e Q_3 localizadas nos vértices de um quadrado. Sendo $Q_1 = Q_3 = 4{,}0\ \mu C$, calcule Q_2 para que o vetor campo elétrico resultante no ponto P seja nulo.

P. 38 Uma pequena esfera de peso $P = 10^{-4}$ N e carga negativa está em equilíbrio num campo elétrico uniforme de intensidade 10^5 N/C. Estando sujeita somente às forças dos campos elétrico e gravitacional, supostos também uniformes, determine:

a) a direção e o sentido das linhas de força do campo elétrico;

b) o valor da carga elétrica;

c) o tipo de equilíbrio que a carga possui: estável, instável ou indiferente.

P. 39 (UFJF-MG) Existe um campo elétrico uniforme no espaço compreendido entre duas placas metálicas eletrizadas com cargas elétricas de sinais opostos. Considere então o campo elétrico uniforme $\vec{E}$ vertical, gerado pelas placas metálicas horizontais eletrizadas, conforme indica a figura. Uma gotícula de óleo de massa m e carga elétrica negativa $-q$ é colocada entre as placas. Seja $\vec{g}$ a aceleração da gravidade local.

a) Desenhe o diagrama de forças para a gotícula, desprezando empuxo e resistência do ar.

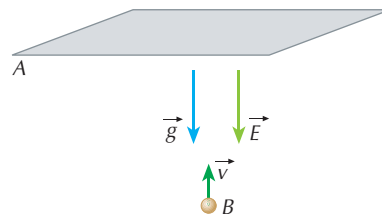
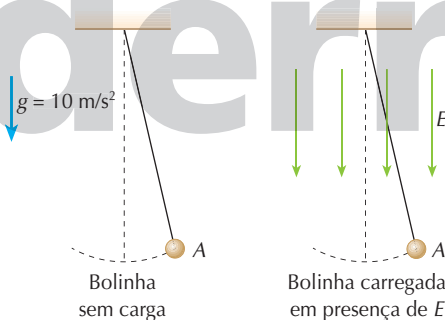
b) Qual a condição necessária para que a carga permaneça em repouso? Nessa situação, encontre o valor da carga q em função das outras grandezas dadas no problema.

P. 40 Entre duas placas horizontais eletrizadas com cargas de sinais opostos, observa-se que uma pequena esfera eletrizada encontra-se em equilíbrio sob ação de seu peso e da força elétrica. Invertendo-se os sinais das cargas elétricas das placas, a pequena esfera entra em movimento. Calcule a aceleração desse movimento.
(É dado $g = 10$ m/s^2.)

P. 41 (Unicamp-SP) Um elétron é acelerado, a partir do repouso, ao longo de 8,8 mm, por um campo elétrico uniforme de intensidade $1{,}0 \cdot 10^5$ N/C. Sabendo-se que a razão carga/massa do elétron vale, em valor absoluto, $1{,}76 \cdot 10^{11}$ C/kg, calcule:

a) a aceleração do elétron;

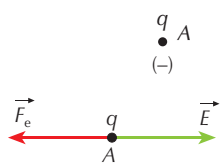
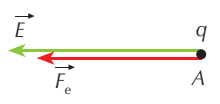
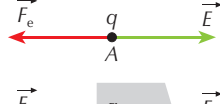
b) a velocidade final do elétron.

P. 42 (UFBA) A figura representa uma placa condutora A, eletricamente carregada, que gera um campo elétrico uniforme $\vec{E}$, de módulo igual a $7 \cdot 10^4$ N/C. A bolinha B, de 10 g de massa e carga negativa igual a $-1\ \mu C$, é lançada verticalmente para cima, com velocidade de módulo igual a 6 m/s. Considerando que o módulo da aceleração da gravidade local vale 10 m/s^2, que não há colisão entre a bolinha e a placa e desprezando a resistência do ar, determine o tempo, em segundos, necessário para a bolinha retornar ao ponto de lançamento.

P. 43 (Fuvest-SP) Um certo relógio de pêndulo consiste em uma pequena bola, de massa $M = 0{,}1$ kg, que oscila presa a um fio. O intervalo de tempo que a bolinha leva para, partindo da posição A, retornar a essa mesma posição é seu período T_0, que é igual a 2 s. Nesse relógio, o ponteiro dos minutos completa uma volta (1 hora) a cada 1.800 oscilações completas do pêndulo.
Estando o relógio em uma região em que atua um campo elétrico E, constante e homogêneo, e a bola carregada com carga elétrica Q, seu período será alterado, passando a T_Q.

Considere a situação em que a bolinha esteja carregada com carga $Q = 3 \times 10^{-5}$ C, em presença de um campo elétrico cujo módulo $E = 1 \times 10^5$ V/m. Então, determine:

a) a intensidade da força efetiva F_e, em N, que age sobre a bola carregada;

b) a razão $R = \dfrac{T_Q}{T_0}$ entre os períodos do pêndulo, quando a bola está carregada e quando não tem carga;

c) a hora que o relógio estará indicando, quando forem de fato três horas da tarde, para a situação em que o campo elétrico tiver passado a atuar a partir do meio-dia.

> Note e adote:
> Nas condições do problema, o período T do pêndulo pode ser expresso por:
>
> $$T = 2\pi \times \sqrt{\dfrac{\text{massa} \times \text{comprimentos do pêndulo}}{F_e}}$$
>
> em que F_e é a força vertical efetiva que age sobre a massa, sem considerar a tensão do fio.

TESTES PROPOSTOS

T. 35 (PUC-SP) Uma carga de prova negativa q é colocada num ponto A, onde há um campo elétrico $\vec{E}$ gerado por uma carga Q positiva, ficando, então, sujeita a uma força $\vec{F}_e$ de intensidade 10 N. Sendo $q = -50$ mC, identifique a opção que fornece o valor correto da intensidade do vetor campo elétrico em A, bem como as orientações corretas dos vetores $\vec{E}$ e $\vec{F}_e$.

a) $2{,}0 \cdot 10^{-1}$ N/C

b) $2{,}0 \cdot 10^{2}$ N/C

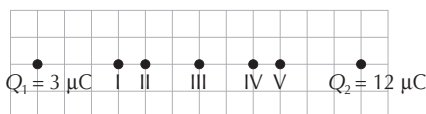
c) $2{,}0 \cdot 10^{5}$ N/C

d) $2{,}0 \cdot 10^{2}$ N/C

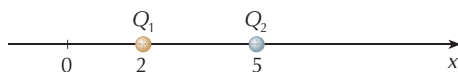
e) $2{,}0 \cdot 10$ N/C

T. 36 (UFSM-RS) Uma partícula com carga de $8 \cdot 10^{-7}$ C exerce uma força elétrica de módulo $1{,}6 \cdot 10^{-2}$ N sobre outra partícula com carga de $2 \cdot 10^{-7}$ C. A intensidade do campo elétrico no ponto onde se encontra a segunda partícula é, em N/C:

a) $3{,}2 \cdot 10^{-9}$
b) $1{,}28 \cdot 10^{-8}$
c) $1{,}6 \cdot 10^{4}$
d) $2 \cdot 10^{4}$
e) $8 \cdot 10^{4}$

T. 37 (UEL-PR) Considere duas cargas puntiformes $Q_1 = 3$ μC e $Q_2 = 12$ μC, fixas e isoladas de outras cargas, nas posições indicadas na figura abaixo.

O módulo do vetor campo elétrico é nulo no ponto:

a) I
b) II
c) III
d) IV
e) V

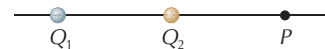
T. 38 (PUC-Campinas-SP) Sobre o eixo x são fixadas duas cargas puntiformes $Q_1 = -2$ μC e $Q_2 = 8$ μC, nos pontos de abscissas 2 e 5, respectivamente, como representado no esquema.

O vetor campo elétrico, resultante da ação dessas duas cargas, tem intensidade nula no ponto de abscissa:

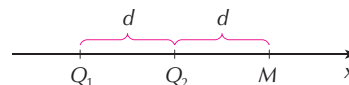
a) 8
b) 6
c) 3
d) 1
e) -1

T. 39 (Mackenzie-SP) Duas cargas elétricas puntiformes $Q_A = +2{,}0$ μC e $Q_B = -5{,}0$ μC encontram-se no vácuo $\left(k_0 = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}\right)$ a uma distância de 10 cm uma da outra. No ponto médio do segmento $\overline{AB}$, o vetor campo elétrico, relativo às cargas Q_A e Q_B:

a) tem intensidade $9{,}0 \cdot 10^6$ N/C e sentido de A para B.
b) tem intensidade $9{,}0 \cdot 10^6$ N/C e sentido de B para A.
c) tem intensidade $2{,}52 \cdot 10^7$ N/C e sentido de A para B.
d) tem intensidade $2{,}52 \cdot 10^7$ N/C e sentido de B para A.
e) tem intensidade $1{,}08 \cdot 10^7$ N/C e sentido de A para B.

T. 40 (PUC-Campinas-SP) Duas cargas elétricas puntiformes $Q_1 = 40$ μC e $Q_2 = -60$ μC estão fixas, separadas 10 cm, no vácuo. No ponto P, a 10 cm de Q_2, conforme mostra a figura abaixo, o módulo do vetor campo elétrico, em N/C, vale:

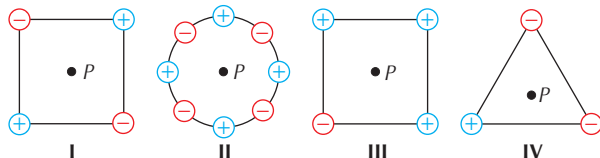
a) zero
b) $9{,}0 \cdot 10^6$
c) $45 \cdot 10^6$
d) $54 \cdot 10^6$
e) $63 \cdot 10^6$

$\left(\text{Dados: } k_0 = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}\right)$

T. 41 (Fatec-SP) Duas cargas pontuais Q_1 e Q_2 são fixadas sobre a reta x representada na figura. Uma terceira carga pontual Q_3 será fixada sobre a mesma reta, de modo que o campo elétrico resultante no ponto M da reta será nulo.

Conhecendo-se os valores das cargas Q_1, Q_2 e Q_3, respectivamente $+4{,}0$ μC, $-4{,}0$ μC e $+4{,}0$ μC, é correto afirmar que a carga Q_3 deverá ser fixada:

a) à direita de M e distante $3d$ desse ponto.
b) à esquerda de M e distante $3d$ desse ponto.
c) à esquerda de M e distante $2\sqrt{3} \cdot d$ desse ponto.
d) à esquerda de M e distante $\frac{2\sqrt{3}}{3} \cdot d$ desse ponto.
e) à direita de M e distante $\frac{2\sqrt{3}}{3} \cdot d$ desse ponto.

T. 42 (Mackenzie-SP) Em cada um dos pontos de coordenadas $(d, 0)$ e $(0, d)$ do plano cartesiano, coloca-se uma carga elétrica puntiforme positiva Q, e em cada um dos pontos de coordenadas $(-d, 0)$ e $(0, -d)$ coloca-se uma carga puntiforme $-Q$. Estando essas cargas no vácuo (constante dielétrica k_0), a intensidade do vetor campo elétrico na origem do sistema cartesiano será igual a:

a) $2\sqrt{2} \cdot \frac{k_0 Q}{d^2}$
b) $\left(2 + \sqrt{2}\right) \cdot \frac{k_0 Q}{d^2}$
c) $\left(2 - \sqrt{2}\right) \cdot \frac{k_0 Q}{d^2}$
d) $\sqrt{2} \cdot \frac{k_0 Q}{d}$
e) $\sqrt{5} \cdot \frac{k_0 Q}{d}$

T. 43 (Efoa-MG) Elétrons e prótons são distribuídos simetricamente em torno de um ponto P nas configurações indicadas nas figuras abaixo.

É correto afirmar que o vetor campo elétrico resultante, no ponto P, é nulo nas figuras:

a) II e III
b) III e IV
c) I e III
d) II e IV
e) I e II

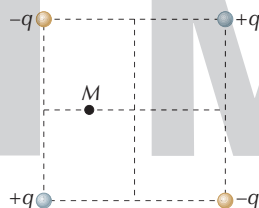
T. 44 (Cesgranrio-RJ) Duas cargas elétricas pontuais, de mesmo valor e com sinais opostos, se encontram em dois dos vértices de um triângulo equilátero. No ponto médio entre esses dois vértices, o módulo do campo elétrico resultante devido às duas cargas vale E. Qual o valor do módulo do campo elétrico no terceiro vértice do triângulo?

a) $\frac{E}{2}$ b) $\frac{E}{3}$ c) $\frac{E}{4}$ d) $\frac{E}{6}$ e) $\frac{E}{8}$

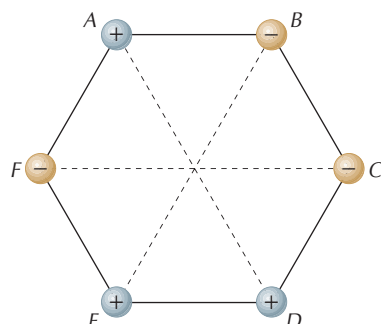
T. 45 (Cesgranrio-RJ) Quatro partículas carregadas estão fixas nos vértices de um quadrado. As cargas das partículas têm o mesmo módulo q, mas os seus sinais se alternam conforme é mostrado na figura. Identifique a opção que melhor representa o vetor campo elétrico no ponto M assinalado na figura.

a)

b)

c)

d)

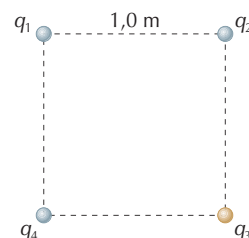
e)

T. 46 (PUC-SP) Seis cargas elétricas puntiformes se encontram no vácuo fixas nos vértices de um hexágono regular de lado ℓ. As cargas têm mesmo módulo, $|Q|$, e seus sinais estão indicados na figura.

Dados:
constante eletrostática do vácuo =
$= k_0 = 9{,}0 \cdot 10^9 \frac{N \cdot m^2}{C^2}$

$\ell = 3{,}0 \cdot 10^1$ cm $|Q| = 5{,}0 \cdot 10^{-5}$ C

No centro do hexágono, o módulo e o sentido do vetor campo elétrico resultante são, respectivamente:

a) $5{,}0 \cdot 10^6$ N/C; de E para B
b) $5{,}0 \cdot 10^6$ N/C; de B para E
c) $5{,}0 \cdot 10^6$ N/C; de A para D
d) $1{,}0 \cdot 10^7$ N/C; de B para E
e) $1{,}0 \cdot 10^7$ N/C; de E para B

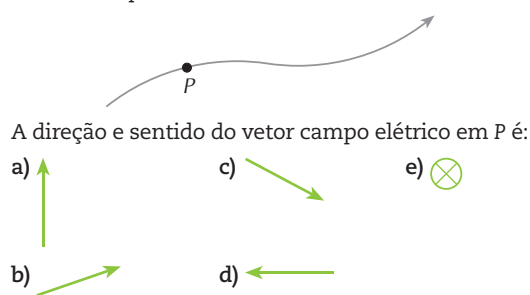
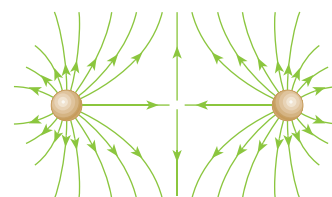
T. 47 (Ufac) Nos vértices de um quadrado de 1,0 m de lado são colocadas as cargas $q_1 = 1{,}0 \cdot 10^{-7}$ C; $q_2 = 2{,}0 \cdot 10^{-7}$ C; $q_3 = -1{,}0 \cdot 10^{-7}$ C e $q_4 = 2{,}0 \cdot 10^{-7}$ C, como mostra a figura.

A intensidade do campo elétrico no centro do quadrado será:

a) $2{,}0 \cdot 10^3$ N/C
b) $3{,}6 \cdot 10^3$ N/C
c) $8{,}0 \cdot 10^3$ N/C
d) $16{,}0 \cdot 10^3$ N/C
e) $32{,}0 \cdot 10^3$ N/C

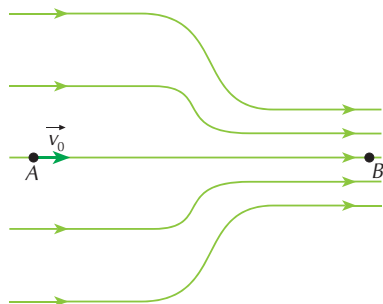
$\left(\text{Dados: } k_0 = 9 \cdot 10^9 \frac{N \cdot m^2}{C^2}\right)$

T. 48 (PUC-MG) A figura representa uma linha de força de um campo elétrico.

A direção e sentido do vetor campo elétrico em P é:

d)

T. 49 (UFMA) A figura representa, na convenção usual, a configuração de linhas de força associadas a duas cargas puntiformes Q_1 e Q_2.

Podemos afirmar, corretamente, que:

a) Q_1 e Q_2 são neutras.
b) Q_1 e Q_2 são cargas negativas.
c) Q_1 é positiva e Q_2 é negativa.
d) Q_1 é negativa e Q_2 é positiva.
e) Q_1 e Q_2 são cargas positivas.

T. 50 (Mackenzie-SP) Uma carga pontual positiva é lançada com velocidade v_0 no campo elétrico representado por suas linhas de força como mostra a figura.

Então:

a) nos pontos A e B a carga possui acelerações iguais.

b) a aceleração da carga no ponto A é menor que no ponto B.

c) a aceleração da carga no ponto A é maior que no ponto B.

d) a velocidade da carga em A é maior que a velocidade em B.

e) a velocidade da carga é a mesma em A e em B.

T. 51 (Vunesp) Uma partícula de massa m e carga q é liberada, a partir do repouso, num campo elétrico uniforme de intensidade E. Supondo que a partícula esteja sujeita exclusivamente à ação do campo elétrico, a velocidade que atingirá t segundos depois de ter sido liberada será dada por:

a) $\frac{qEt}{m}$

b) $\frac{mt}{qE}$

c) $\frac{qmt}{E}$

d) $\frac{Et}{qm}$

e) $\frac{t}{qmE}$

T. 52 (Unaerp-SP) Um campo elétrico uniforme existe na região entre duas placas planas paralelas com cargas de sinais opostos. Um elétron de massa $m \simeq 9 \cdot 10^{-31}$ kg e carga $q = -1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C é abandonado em repouso junto à superfície da placa carregada negativamente e atinge a superfície da placa oposta, a 12 cm de distância da primeira, em um intervalo de tempo de $3 \cdot 10^{-7}$ s. Determine a intensidade do campo elétrico e a velocidade do elétron no momento em que atinge a segunda placa. Identifique a opção correta.

a) $E = 15$ N/C; $v = 8 \cdot 10^5$ m/s

b) $E = 200$ N/C; $v = 4$ km/h

c) $E = 100$ N/C; $v = 2 \cdot 10^6$ m/s

d) $E = 10^6$ N/C; $v = 2 \cdot 10^6$ m/s

e) $E = 5$ N/C; $v = 8 \cdot 10^5$ m/s

T. 53 (UFJF-MG) Uma gotícula de óleo, de massa $m \simeq 9{,}6 \cdot 10^{-15}$ kg e carregada com carga elétrica $q = -3{,}2 \cdot 10^{-19}$ C, cai verticalmente no vácuo. Num certo instante, liga-se nessa região um campo elétrico uniforme, vertical e apontando para baixo. O módulo desse campo elétrico é ajustado até que a gotícula passe a cair com movimento retilíneo e uniforme. Nessa situação, qual o valor do módulo do campo elétrico?

a) $3{,}0 \cdot 10^5$ N/C

b) $2{,}0 \cdot 10^7$ N/C

c) $5{,}0 \cdot 10^3$ N/C

d) $8{,}0 \cdot 10^{-3}$ N/C

(Dado: $g = 10$ m/s²)

T. 54 (Inatel-MG) Uma pequena esfera de carga conhecida q e massa desconhecida m, inicialmente em repouso, cai de uma altura h na presença de um campo elétrico uniforme E dirigido verticalmente para baixo. A esfera chega ao solo com uma velocidade $v = 2\sqrt{gh}$. O valor da massa m da esfera em função de E, q e g é expressa na forma:

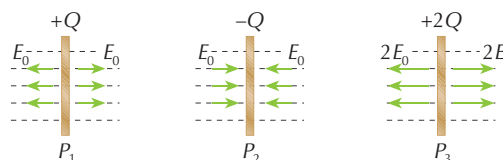
a) $\frac{qE}{g}$

b) $\frac{gE}{q}$

c) $\frac{E}{qg}$

d) $\frac{qg}{E}$

e) $\frac{q}{Eg}$

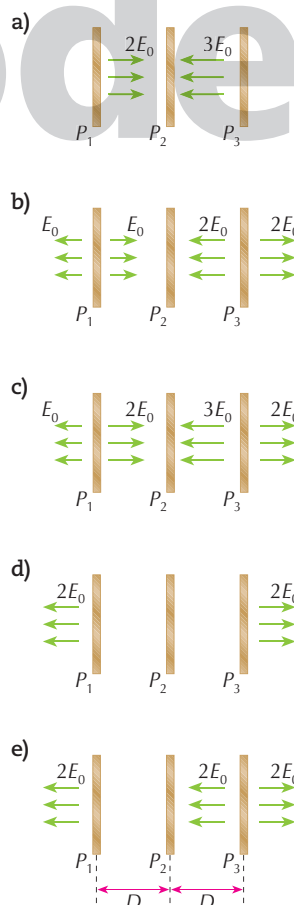
T. 55 (Fuvest-SP) Três grandes placas, P_1, P_2 e P_3, com, respectivamente, cargas $+Q$, $-Q$ e $+2Q$, geram campos elétricos uniformes em certas regiões do espaço. As figuras abaixo mostram, cada uma, intensidade, direção e sentido dos campos criados pelas respectivas placas P_1, P_2 e P_3, quando vistas de perfil.

Colocando-se as placas próximas, separadas pela distância D indicada, o campo elétrico resultante, gerado pelas três placas em conjunto, é representado por:

a)

b)

c)

d)

e)

Nota: onde não há indicação, o campo elétrico é nulo.

UNIDADE A

Capítulo 3

Trabalho e potencial elétrico

A cada ponto de um campo elétrico associa-se a grandeza escalar **potencial elétrico.** Com base nessa grandeza, pode-se determinar a intensidade de diversas interações entre as cargas elétricas presentes nesse campo.

O globo de plasma é preenchido com argônio à baixa pressão. Uma fonte de alta tensão excita e ioniza alguns átomos do gás argônio. Quando voltam ao estado inicial, esses átomos emitem luz azulada.

Trabalho da força elétrica

Objetivos

- Analisar o trabalho da força elétrica em um campo elétrico uniforme.
- Analisar o trabalho da força elétrica em um campo elétrico qualquer.

1 Trabalho da força elétrica num campo uniforme

Considere um campo elétrico uniforme de intensidade E. Nesse campo, vamos supor que uma carga elétrica puntiforme q positiva, por exemplo, sofre um deslocamento do ponto A até o ponto B, ao longo de uma linha de força (**fig. 1**).

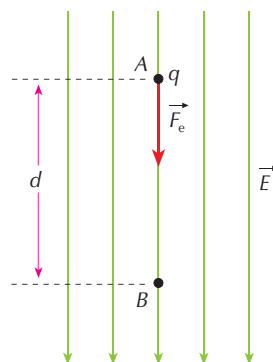



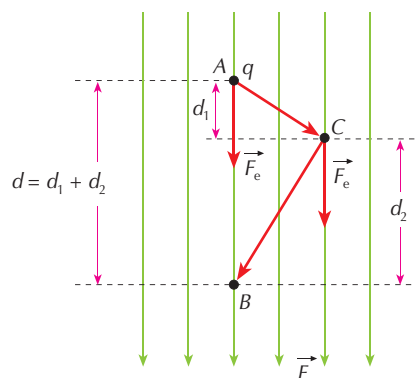
Figura 1.

A força elétrica $\vec{F}_e = q\vec{E}$, que age em q, é constante, pois o campo é uniforme ($\vec{E}$ constante). Seja d o módulo do deslocamento de A a B e $F_e = qE$ a intensidade da força elétrica. Da definição de trabalho de uma força constante e paralela ao deslocamento, vem:

$$\begin{cases} \mathcal{T}_{AB} = F_e d \\ F_e = qE \end{cases} \Rightarrow \boxed{\mathcal{T}_{AB} = qEd}$$

Esse trabalho é positivo (trabalho motor), pois a força elétrica está a favor do deslocamento. Se q fosse levada de B até A, a força elétrica teria sentido contrário ao deslocamento e o trabalho seria negativo (trabalho resistente). Se q vai de A até B, passando por um ponto intermediário C (**fig. 2**), para o cálculo do trabalho projetamos o deslocamento na direção da força. Sejam d_1 a projeção de $\overline{AC}$ e d_2 a projeção de $\overline{CB}$. Daí:

Figura 2.

$$\mathcal{T}_{AB} = \mathcal{T}_{AC} + \mathcal{T}_{CB} = qEd_1 + qEd_2 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \mathcal{T}_{AB} = qE \cdot (d_1 + d_2) \Rightarrow \boxed{\mathcal{T}_{AB} = qEd}$$

Considere, agora, uma sucessão de segmentos de reta $\overline{AC}$, $\overline{CD}$, $\overline{DE}$, ..., $\overline{XB}$ de A até B (**fig 3A**). Pelo raciocínio anterior, sejam d_1, d_2, d_3, ..., d_n as projeções desses segmentos na direção da força. Temos:

$$\mathcal{T}_{AB} = qEd_1 + qEd_2 + qEd_3 + ... + qEd_n$$

$$\mathcal{T}_{AB} = qE \cdot (d_1 + d_2 + d_3 + ... + d_n)$$

$$\boxed{\mathcal{T}_{AB} = qEd}$$

A

B

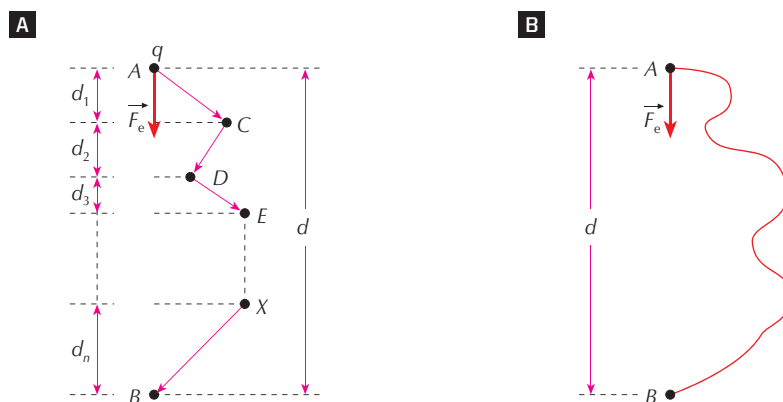



Figura 3.

Se a linha poligonal $ACDE...XB$ possui um conjunto demasiadamente grande de segmentos (**fig. 3B**), ela tende a uma curva. O trabalho da força elétrica entre os pontos A e B, porém, continua o mesmo e, portanto, **não depende da forma da trajetória**.

Essa conclusão, embora demonstrada para o caso particular do campo elétrico uniforme, é válida para um campo elétrico qualquer.

2 Trabalho da força elétrica num campo elétrico* qualquer

Quando uma carga elétrica q se desloca num campo elétrico qualquer de um ponto A para um ponto B, **o trabalho da força elétrica resultante**, que age em q, **não depende da forma da trajetória**, que liga A com B, **e depende dos pontos de partida (*A*) e de chegada (*B*)**.

Desse modo, no campo elétrico da **figura 4**, o trabalho da força elétrica é o mesmo, quer a trajetória seja (1), (2) ou (3).

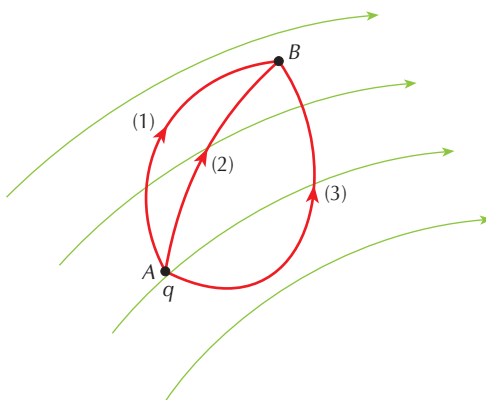



Figura 4. $\mathcal{T}_{AB}$ **independe da trajetória entre *A* e *B*.**

* Todas as conclusões apresentadas neste capítulo são válidas para um campo elétrico qualquer mas estacionário, isto é, em cada ponto o vetor campo elétrico não varia no decorrer do tempo (campo eletrostático).

Seção 3.2

Diferença de potencial elétrico

Objetivos

- Definir diferença de potencial elétrico.
- Compreender o conceito de potencial elétrico.
- Analisar o potencial elétrico em um ponto de um campo elétrico gerado por uma ou por várias cargas elétricas puntiformes.
- Conhecer a unidade de medida de potencial elétrico.
- Conceituar energia potencial elétrica.

Termos e conceitos

- tensão elétrica
- campo conservativo
- forças conservativas
- elétron-volt

Considere uma carga elétrica q num campo elétrico qualquer. O trabalho realizado para deslocar a carga elétrica do ponto A para o ponto B é o mesmo, independentemente da trajetória (**fig. 5A**). Entretanto, verifica-se que, se outra carga for deslocada entre os pontos A e B, altera-se o trabalho da força elétrica, porém o quociente $\frac{\tau_{AB}}{q}$ permanece constante e só depende dos pontos A e B do campo.

A grandeza escalar $\frac{\tau_{AB}}{q}$, que depende dos pontos A e B do campo, é indicada por $V_A - V_B$ ou por U, e recebe o nome de **diferença de potencial elétrico** entre os pontos A e B (abreviadamente **ddp**) ou **tensão elétrica** entre os pontos A e B.

$$V_A - V_B = \frac{\tau_{AB}}{q} \quad \text{ou} \quad U = \frac{\tau_{AB}}{q}$$

V_A e V_B são os **potenciais elétricos dos pontos** A e B. O potencial elétrico é uma grandeza escalar associada a cada ponto do campo (**fig. 5B**).

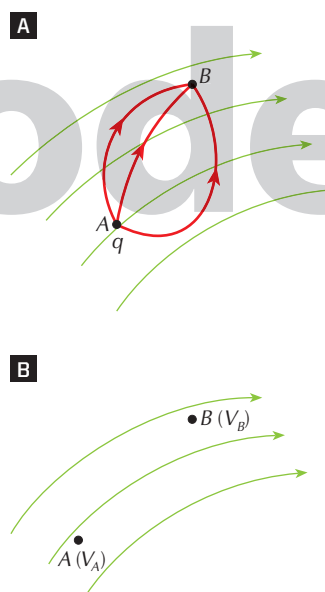



Figura 5. (A) Para transportar duas cargas diferentes de A para B, o τ_{AB} será diferente para cada carga, porém, o quociente $\frac{\tau_{AB}}{q}$ permanece constante. (B) A cada ponto de um campo elétrico associa-se um potencial elétrico. V_A e V_B são os potenciais elétricos em A e B, respectivamente, e $V_A - V_B$ é a ddp entre A e B.

Unidade de diferença de potencial

A partir da fórmula anterior estabelecemos a unidade de diferença de potencial.

$$\text{unidade de ddp} = \frac{\text{unidade de trabalho}}{\text{unidade de carga}}$$

No Sistema Internacional de Unidades, temos:

$$\text{unidade de ddp} = 1\,\frac{\text{joule}}{\text{coulomb}} = 1\,\frac{\text{J}}{\text{C}} = 1\text{ volt} = 1\text{ V}$$

O nome **volt** (símbolo **V**) dado à unidade de ddp é uma homenagem ao físico italiano Alessandro Volta.

Concluindo, podemos afirmar que o trabalho da força elétrica num campo elétrico qualquer depende da carga elétrica q e dos pontos de partida (A) e de chegada (B), sendo expresso pelas fórmulas:

$$\mathcal{T}_{AB} = qU \quad \text{ou} \quad \mathcal{T}_{AB} = q \cdot (V_A - V_B)$$

1 Potencial elétrico num ponto de um campo elétrico qualquer

A fórmula $V_A - V_B = \frac{\mathcal{T}_{AB}}{q}$ permite determinar a diferença de potencial entre dois pontos de um campo elétrico. Para o cálculo do potencial elétrico em um ponto é preciso **atribuir um valor arbitrário** (por exemplo, zero) ao potencial elétrico de outro ponto. Assim, se a ddp entre dois pontos A e B de um campo elétrico é 50 V ($V_A - V_B = 50$ V), convencionando-se $V_B = 0$, teremos $V_A = 50$ V. Porém, se convencionarmos $V_A = 0$, teremos $V_B = -50$ V.

O ponto cujo potencial elétrico é convencionado nulo constitui o ponto de referência para a medida de potenciais.

Observe que, mudando o ponto de referência, os potenciais mudam, mas a ddp entre dois pontos permanece a mesma.

Sendo $V_A - V_B = \frac{\mathcal{T}_{AB}}{q}$ e adotando $V_B = 0$ (potencial de referência), vem:

$$V_A = \frac{\mathcal{T}_{AB}}{q}$$

Ou seja:

O potencial elétrico V_A do ponto A em relação a um ponto B é medido pelo trabalho da força elétrica que atua sobre uma carga unitária q no deslocamento dessa carga desde o ponto A até o ponto de referência B.

EXERCÍCIO RESOLVIDO

R. 22 Uma carga elétrica puntiforme $q = 1\ \mu C$ é transportada de um ponto A até um ponto B de um campo elétrico. A força elétrica que age em q realiza um trabalho $\mathcal{T}_{AB} = 10^{-4}$ J. Determine:

a) a diferença de potencial elétrico entre os pontos A e B;

b) o potencial elétrico de A, adotando-se B como ponto de referência.

Solução:

a) Da expressão do trabalho da força elétrica temos $\mathcal{T}_{AB} = q(V_A - V_B)$.

Sendo $\mathcal{T}_{AB} = 10^{-4}$ J e $q = 1\ \mu C = 10^{-6}$ C, vem: $10^{-4} = 10^{-6} \cdot (V_A - V_B) \Rightarrow \boxed{V_A - V_B = 100\text{ V}}$

b) Fazendo $V_B = 0$ (potencial de referência), temos: $\boxed{V_A = 100\text{ V}}$

Resposta: a) 100 V; b) 100 V

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

P. 44 Num campo elétrico, leva-se uma carga puntiforme $q = 5 \cdot 10^{-6}$ C de um ponto A até um ponto B. O trabalho da força elétrica é de -10^{-4} J. Qual a ddp entre os pontos A e B?

P. 45 Dois pontos A e B de um campo elétrico têm potenciais iguais a 150 V e 100 V, respectivamente, em relação a um determinado ponto de referência. Qual o novo potencial de A, adotando-se B como referencial?

2 Potencial elétrico no campo de uma carga puntiforme

Considere o campo elétrico originado por uma carga elétrica puntiforme Q, fixa e no vácuo. A e B são dois pontos desse campo, distantes respectivamente d_A e d_B da carga Q fixa (**fig. 6**).

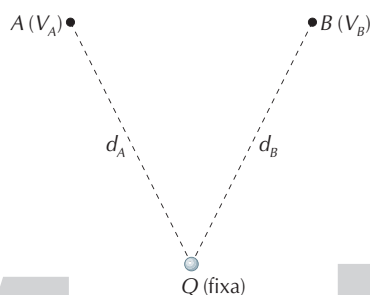



Figura 6.

Pode-se demonstrar que a diferença de potencial entre A e B vale:

$$V_A - V_B = k_0 \cdot \frac{Q}{d_A} - k_0 \cdot \frac{Q}{d_B}$$

em que k_0 é a constante eletrostática do vácuo.

Adotando B como ponto de referência ($V_B = 0$) e supondo-o infinitamente afastado da carga Q, ou seja, $d_B \to \infty$ (lê-se d_B tende ao infinito). tem-se que $k_0 \cdot \frac{Q}{d_B} \to 0$ $\left(\text{lê-se } k_0 \cdot \frac{Q}{d_B} \text{ tende a zero}\right)$.

Nessas condições, temos:

$V_A = k_0 \cdot \frac{Q}{d_A}$, potencial elétrico do ponto A em relação a um ponto de referência infinitamente afastado.

De modo geral associamos a cada ponto P do campo de uma carga elétrica puntiforme Q, situado à distância d dessa carga, um potencial elétrico V_P, tal que:

$$V_P = k_0 \cdot \frac{Q}{d}$$

em relação a um ponto de referência no infinito.

Ressaltemos novamente que o **potencial elétrico** é uma **grandeza escalar** que, adotando-se um ponto de referência no infinito, será positiva se $Q > 0$ ou negativa se $Q < 0$.

A **figura 7** mostra os gráficos de V_P em função de d no campo de uma carga puntiforme Q.

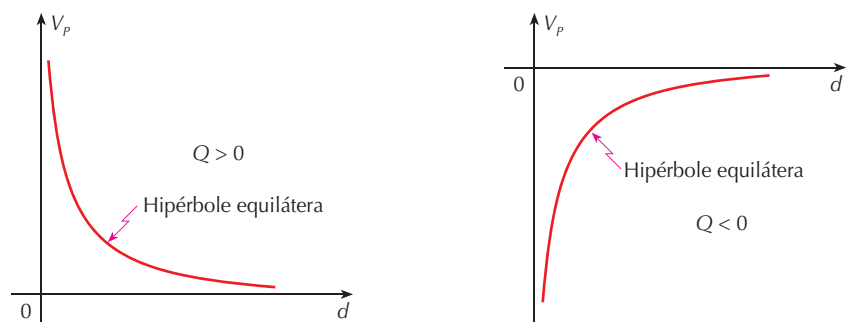



Figura 7. **Gráficos V_P *versus* d. Ponto de referência no infinito.**

EXERCÍCIO RESOLVIDO

R. 23 Considere o campo elétrico gerado pela carga puntiforme $Q = 1{,}2 \cdot 10^{-8}$ C, no vácuo. Determine:

a) os potenciais elétricos nos pontos A e B indicados;

b) o trabalho da força elétrica que age numa carga $q = 1\ \mu C$ ao ser deslocada de A para B.

Adote o referencial no infinito. É dado $k_0 = 9 \cdot 10^9 \dfrac{N \cdot m^2}{C^2}$.

Solução:

a) A expressão do potencial num ponto à distância d da carga Q é: $V = k_0 \cdot \dfrac{Q}{d}$

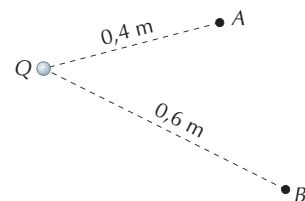
Em A, temos $V_A = k_0 \cdot \dfrac{Q}{d_A}$.

Sendo $k_0 = 9 \cdot 10^9 \dfrac{N \cdot m^2}{C^2}$, $Q = 1{,}2 \cdot 10^{-8}$ C e $d_A = 0{,}4$ m, vem:

$$V_A = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{1{,}2 \cdot 10^{-8}}{0{,}4} \Rightarrow \boxed{V_A = 270\ V}$$

Em B temos $V_B = k_0 \cdot \dfrac{Q}{d_B}$. Sendo $d_B = 0{,}6$ m, vem: $V_B = 9 \cdot 10^9 \cdot \dfrac{1{,}2 \cdot 10^{-8}}{0{,}6} \Rightarrow \boxed{V_B = 180\ V}$

b) O trabalho da força elétrica que age numa carga $q = 1\ \mu C = 10^{-6}$ C no deslocamento de A para B é: $\mathcal{T}_{AB} = q(V_A - V_B) \Rightarrow \mathcal{T}_{AB} = 10^{-6} \cdot (270 - 180) \Rightarrow \boxed{\mathcal{T}_{AB} = 9 \cdot 10^{-5}\ J}$

Resposta: a) $V_A = 270$ V e $V_B = 180$ V; b) $9 \cdot 10^{-5}$ J

EXERCÍCIO PROPOSTO

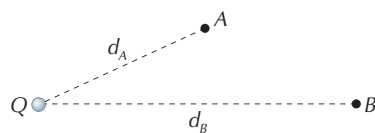
P. 46 No campo de uma carga puntiforme $Q = 3\ \mu C$ são dados dois pontos A e B cujas distâncias à carga Q são, respectivamente, $d_A = 0{,}3$ m e $d_B = 0{,}9$ m. O meio é o vácuo.

Determine:

a) os potenciais elétricos em A e B (adote o referencial no infinito).

b) o trabalho da força elétrica que atua numa carga $q = 5\ \mu C$, ao ser deslocada de A para B.

c) o trabalho da força elétrica que atua na mesma carga $q = 5\ \mu C$, ao ser deslocada de B para A.

Dado: $k_0 = 9 \cdot 10^9 \dfrac{N \cdot m^2}{C^2}$

3 Potencial elétrico no campo de várias cargas

Considere o campo elétrico originado por várias cargas Q_1, Q_2, ..., Q_n, fixas no vácuo (**fig. 8**).

O potencial elétrico num ponto P do campo é a soma algébrica dos potenciais em P, produzidos separadamente pelas cargas Q_1, Q_2, ..., Q_n.

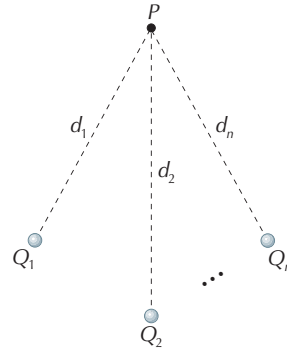



Figura 8. O potencial elétrico no ponto P devido a várias cargas é a soma algébrica dos potenciais parciais.

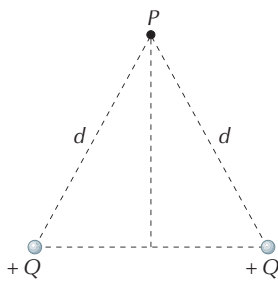
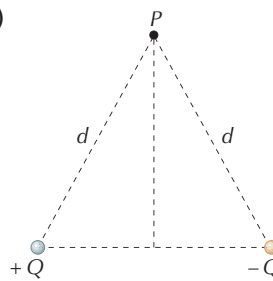
Adotando o ponto de referência no infinito, temos:

$$V_P = k_0 \cdot \frac{Q_1}{d_1} + k_0 \cdot \frac{Q_2}{d_2} + \dots + k_0 \cdot \frac{Q_n}{d_n}$$

EXERCÍCIO RESOLVIDO

R. 24 Determine o potencial elétrico resultante em P nos casos **a** e **b** indicados. Admita, em cada caso, que $Q = 10^{-6}$ C e $d = 0,3$ m.

O meio é o vácuo $\left(k_0 = 9 \cdot 10^9 \frac{N \cdot m^2}{C^2}\right)$.

a)

b)

Solução:

Quando o exercício não especifica o referencial, adota-se o infinito.

a) O potencial elétrico num ponto P do campo é a soma algébrica dos potenciais parciais. Assim, temos:

$$V_P = k_0 \cdot \frac{+Q}{d} + k_0 \cdot \frac{+Q}{d}$$

Sendo $k_0 = 9 \cdot 10^9 \frac{N \cdot m^2}{C^2}$, $Q = 10^{-6}$ C e $d = 0,3$ m, vem:

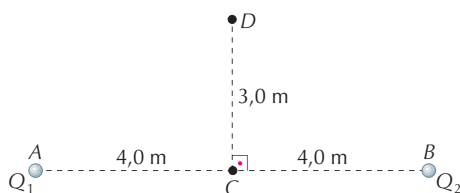
$$V_P = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{10^{-6}}{0,3} + 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{10^{-6}}{0,3} \Rightarrow \boxed{V_P = 6 \cdot 10^4 \text{ V}}$$

b) Neste caso:

$$V_P = k_0 \cdot \frac{+Q}{d} + k_0 \cdot \frac{-Q}{d} \Rightarrow \boxed{V_P = 0}$$

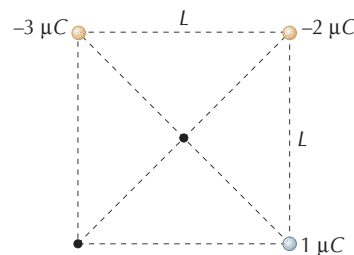
Resposta: a) $6 \cdot 10^4$ V; b) zero

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

P. 47 Duas cargas elétricas puntiformes $Q_1 = 2{,}0\ \mu C$ e $Q_2 = 4{,}0\ \mu C$ estão fixas nos pontos A e B, separados pela distância $d = 8{,}0$ m, no vácuo.

Dado $k_0 = 9 \cdot 10^9 \frac{N \cdot m^2}{C^2}$, determine:

a) os potenciais elétricos resultantes nos pontos C e D. O ponto C é médio de $\overline{AB}$;

b) o trabalho da força elétrica resultante que atua numa carga $q = 2{,}0 \cdot 10^{-7}$ C, ao ser levada de C para D.

P. 48 Em três vértices de um quadrado de lado $L = \sqrt{2}$ fixam-se cargas elétricas, conforme a figura, sendo o meio o vácuo.

Dado $k_0 = 9 \cdot 10^9 \frac{N \cdot m^2}{C^2}$, determine:

a) o potencial elétrico resultante no centro do quadrado;

b) a carga elétrica que deve ser fixada no quarto vértice, de modo que se torne nulo o potencial elétrico no centro do quadrado.

4 Energia potencial elétrica

Um campo de forças cujo trabalho entre dois pontos não depende da forma da trajetória é um **campo conservativo**. As forças desse campo são chamadas **forças conservativas**. É o caso da **força gravitacional**, da **força elástica** e da **força elétrica**.

Aos campos de forças conservativas associa-se o conceito de **energia potencial**.

Assim, por exemplo, uma carga elétrica puntiforme q, abandonada em repouso num ponto A de um campo elétrico uniforme (**fig. 9A**) ou no campo de uma carga elétrica puntiforme Q (**fig. 9B**), fica sujeita a uma força elétrica $\vec{F}_e$ e desloca-se, espontaneamente, na direção e no sentido da força. Nessas condições, $\vec{F}_e$ realiza trabalho positivo.

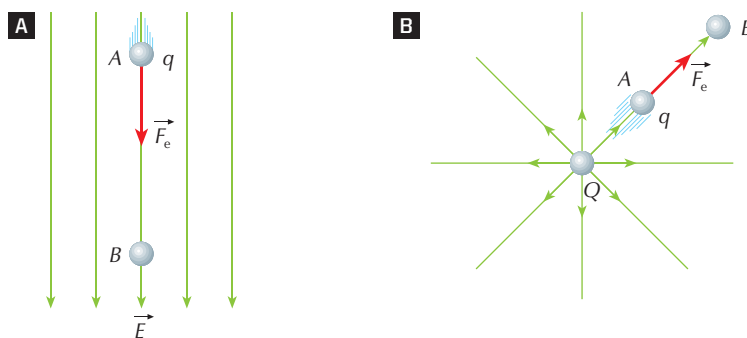



Figura 9. **A carga *q*, ao ser colocada em *A*, adquire energia potencial elétrica.**

Pelo teorema da energia cinética, o trabalho da força é medido pela variação da energia cinética entre os pontos A e B:

$$\mathcal{T}_{AB} = E_{c(B)} - E_{c(A)} = E_{c(B)}, \text{ pois } E_{c(A)} = 0 \quad (q \text{ parte do repouso em } A)$$

Na posição A, q não possui energia cinética (foi abandonada em repouso), mas possui a qualidade em potencial de vir a ter energia cinética, pois, ao ser abandonada, a força elétrica realiza trabalho (entre A e B) igual à energia cinética de q ao passar por B. Desse modo, **na posição *A* a carga *q* tem energia associada à sua posição. Essa energia é denominada energia potencial elétrica.**

Em relação a um ponto de referência em B, a energia potencial elétrica da carga q, no ponto A ($E_{p(A)}$), é igual ao trabalho da força elétrica no deslocamento de A a B ($\mathcal{T}_{AB}$).

Como $E_{p(A)} = \mathcal{T}_{AB}$ e $\mathcal{T}_{AB} = q(V_A - V_B)$, temos:

$$E_{p(A)} = q(V_A - V_B)$$

Mas $V_B = 0$ (potencial de referência).

Portanto:

$$\boxed{E_{p(A)} = qV_A}$$

A unidade elétron-volt

Dá-se o nome de **elétron-volt** (símbolo **eV**) ao trabalho realizado pela força elétrica no deslocamento espontâneo de um elétron num campo elétrico, entre dois pontos A e B, tais que entre eles exista uma ddp de 1 volt ($V_B - V_A = 1$ V).

O elétron-volt é usado como unidade de energia na análise do movimento de partículas atômicas. Sua correspondência com o joule (J) é a seguinte:

$\mathcal{T}_{AB} = q(V_A - V_B)$, em que $q = -1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C (carga do elétron) e $\mathcal{T}_{AB} = 1$ eV

Assim:

$$1 \text{ eV} = -1{,}6 \cdot 10^{-19} \cdot (-1) \Rightarrow \boxed{1 \text{ eV} = 1{,}6 \cdot 10^{-19} \text{ J}}$$

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

R. 25 Calcule a energia potencial elétrica que $q = 2$ μC adquire ao ser colocada num ponto P de um campo elétrico cujo potencial é $V_P = 200$ V.

Solução:

A energia potencial elétrica $E_{p(P)}$ que q adquire ao ser colocada em P é dada por $E_{p(P)} = qV_P$ (produto da carga q pelo potencial elétrico V_P do ponto P).

Sendo $q = 2\ \mu C = 2 \cdot 10^{-6}$ C e $V_P = 200$ V, vem: $E_{p(P)} = 2 \cdot 10^{-6} \cdot 200 \Rightarrow \boxed{E_{p(P)} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ J}}$

Resposta: $4 \cdot 10^{-4}$ J

R. 26 No campo de uma carga puntiforme $Q = 2 \cdot 10^{-7}$ C, considere um ponto P a 0,2 m de Q. Qual a energia potencial elétrica que $q = 1$ μC adquire ao ser colocada em P? O meio é o vácuo $\left(k_0 = 9 \cdot 10^9 \frac{N \cdot m^2}{C^2}\right)$.

Solução:

De $E_{p(P)} = q \cdot V_P$, sendo $V_P = k_0 \cdot \frac{Q}{d}$, temos: $E_{p(P)} = k_0 \cdot \frac{Q \cdot q}{d}$

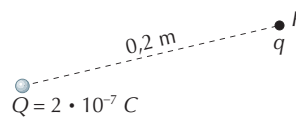
Para $k_0 = 9 \cdot 10^9 \frac{N \cdot m^2}{C^2}$, $Q = 2 \cdot 10^{-7}$ C, $q = 1\ \mu C = 10^{-6}$ C e $d = 0{,}2$ m, temos:

(Figura: $Q = 2 \cdot 10^{-7}$ C — 0,2 m — P, q)

$$E_{p(P)} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{2 \cdot 10^{-7} \cdot 10^{-6}}{0{,}2} \Rightarrow \boxed{E_{p(P)} = 9 \cdot 10^{-3} \text{ J}}$$

Resposta: $9 \cdot 10^{-3}$ J

Observação:

A fórmula $E_{p(P)} = k_0 \cdot \frac{Q \cdot q}{d}$ representa a energia potencial elétrica do par de cargas Q e q.

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

P. 49 No ponto P de um campo elétrico onde o potencial é $V_P = -1.000$ V, coloca-se uma carga $q = 3$ μC. Qual a energia potencial elétrica que q adquire?

P. 50 Um campo elétrico é produzido no vácuo por duas cargas puntiformes de -2 μC e 5 μC, respectivamente. Calcule:

a) o potencial elétrico num ponto P, que dista 0,20 m da primeira e 0,50 m da segunda;

b) a energia potencial elétrica que $q = 6 \cdot 10^{-8}$ C adquire ao ser colocada em P.

5 Propriedades do potencial elétrico

Uma carga elétrica puntiforme q, abandonada em repouso num ponto A de um campo elétrico, fica sujeita a uma força elétrica resultante $\vec{F}_e$ e desloca-se espontaneamente. Nessas condições, $\vec{F}_e$ realiza trabalho positivo.

Sendo B um ponto da trajetória, temos $\mathcal{T}_{AB} > 0$. De $\mathcal{T}_{AB} = q(V_A - V_B) > 0$ resultam duas possibilidades:

1ª) $q > 0 \Rightarrow V_A - V_B > 0 \Rightarrow V_A > V_B$

Cargas elétricas **positivas**, abandonadas em repouso num campo elétrico e sujeitas apenas à força elétrica, deslocam-se, espontaneamente, para pontos de **menor potencial**.

2ª) $q < 0 \Rightarrow V_A - V_B < 0 \Rightarrow V_A < V_B$

Cargas elétricas **negativas**, abandonadas em repouso num campo elétrico e sujeitas apenas à força elétrica, deslocam-se, espontaneamente, para pontos de **maior potencial**.

Sendo $\mathcal{T}_{AB} = q(V_A - V_B) > 0$, vem: $qV_A - qV_B > 0 \Rightarrow E_{p(A)} - E_{p(B)} > 0 \Rightarrow E_{p(A)} > E_{p(B)}$

Em todo movimento espontâneo de cargas elétricas num campo elétrico, a energia potencial elétrica diminui.

Vamos agora supor que um operador desloque uma carga $q > 0$ ao longo de uma linha de força de um campo elétrico qualquer (**fig. 10**), desde A até B. A força elétrica resultante, que atua em q, tem a direção e o sentido de $\vec{E}$, em cada ponto, de modo que o trabalho $\mathcal{T}_{AB}$ da força elétrica resulte positivo.

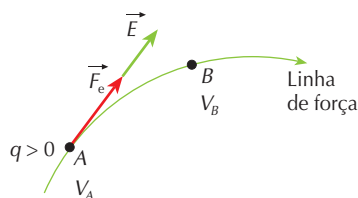



Figura 10.

De $\mathcal{T}_{AB} = q(V_A - V_B) > 0$ e sendo $q > 0$, vem $V_A - V_B > 0$ e, portanto, $V_A > V_B$.

Conclusão:

Percorrendo-se uma linha de força no seu sentido, o potencial elétrico ao longo de seus pontos diminui.

Seção 3.3

Superfície equipotencial

Objetivos

- Caracterizar superfícies equipotenciais.
- Conhecer as superfícies equipotenciais no campo elétrico uniforme.
- Analisar a diferença de potencial entre dois pontos em um campo elétrico uniforme.

Termos e conceitos

- superfícies esféricas concêntricas

Superfície equipotencial em um campo elétrico é qualquer superfície cujos pontos têm **potenciais elétricos iguais**.

No campo de uma carga puntiforme Q, as superfícies equipotenciais são esféricas e concêntricas com a carga (**fig. 11**): da expressão do potencial elétrico $V_P = k_0 \cdot \frac{Q}{d}$, os pontos que possuem mesmo potencial elétrico V_P devem estar à mesma distância d de Q. Observe na **figura 11** que:

> As linhas de força são perpendiculares às superfícies equipotenciais.

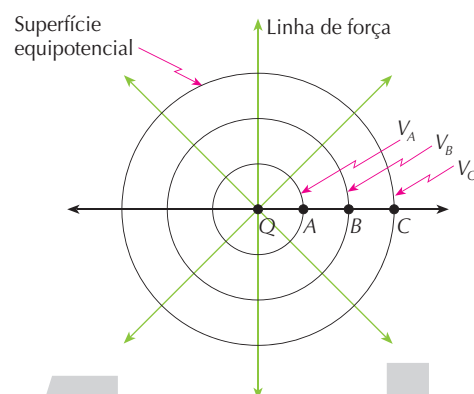



Figura 11. No campo de uma carga puntiforme, as superfícies equipotenciais são esféricas.

Essa propriedade é válida em qualquer campo elétrico.

De fato, sendo A e B dois pontos de uma mesma superfície equipotencial de um campo elétrico qualquer (**fig. 12**),desloquemos uma carga q de A até B. Admitindo-se A e B muito próximos, podemos considerar o deslocamento de A até B retilíneo ($AB = d$) e a força elétrica resultante $\vec{F}_e$, que age em q, constante.

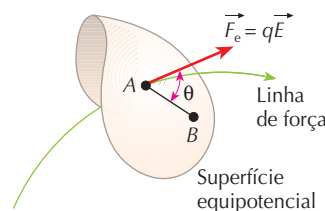



Figura 12.

Assim, temos: $\mathcal{T}_{AB} = F_e \cdot d \cdot \cos\theta$

Mas: $\mathcal{T}_{AB} = q(V_A - V_B)$

Como A e B pertencem a uma mesma superfície equipotencial ($V_A = V_B$), resulta $\mathcal{T}_{AB} = 0$. Portanto:

$$F_e \cdot d \cdot \cos\theta = 0$$

Como $F_e \neq 0$ e $d \neq 0$, temos $\cos\theta = 0$ e portanto:

$$\theta = 90°$$

Isso significa que $\vec{F}_e$ é perpendicular ao deslocamento de A para B e, consequentemente, à superfície equipotencial. Como $\vec{F}_e$ e $\vec{E}$ têm mesma direção, e sendo a linha de força tangente ao vetor campo $\vec{E}$, resulta que esta também é perpendicular à superfície equipotencial.

1 Superfície equipotencial em um campo elétrico uniforme

Particularmente, para o campo elétrico uniforme (**fig. 13**), verifica-se que as superfícies equipotenciais, por serem perpendiculares às linhas de força, são planos paralelos entre si.

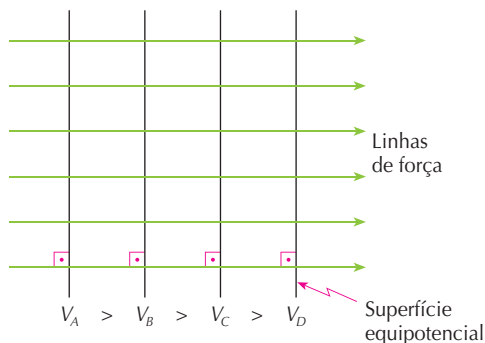



Figura 13. Num campo uniforme, as superfícies equipotenciais são planas.

2 Diferença de potencial entre dois pontos de um campo elétrico uniforme

Considere dois pontos A e B de um campo elétrico uniforme de intensidade E. Sejam V_A e V_B os potenciais elétricos de A e B, respectivamente, e seja d a distância entre as superfícies equipotenciais que passam por A e B (**fig. 14**).

Vimos, na seção 3.1 deste capítulo, que, quando uma carga puntiforme $q > 0$ é deslocada de A a B, a força elétrica realiza trabalho, $\mathcal{T}_{AB} = qEd$.

De $U = V_A - V_B = \frac{\mathcal{T}_{AB}}{q}$, resulta: $U = V_A - V_B = Ed$

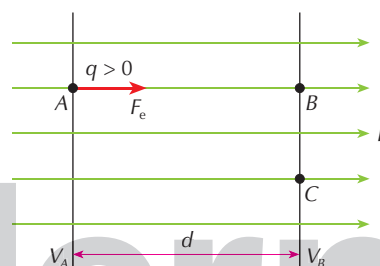



Figura 14.

Na **figura 14**, observe que a ddp entre os pontos A e C ($V_A - V_C$) é igual à ddp entre A e B ($V_A - V_B$), pois B e C pertencem à mesma superfície equipotencial ($V_B = V_C$).

Da igualdade anterior, temos:

$$E = \frac{U}{d}$$

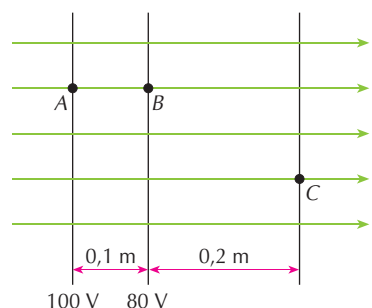
Assim, a unidade de intensidade de campo no Sistema Internacional é **volt/metro** (símbolo **V/m**), equivalente ao **newton/coulomb** (símbolo **N/C**), que usamos no capítulo 2.

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

R. 27 São dadas as linhas de força e as superfícies equipotenciais de um campo uniforme. Determine:

a) a intensidade E do campo elétrico;

b) o potencial elétrico do ponto C;

c) o trabalho da força elétrica que atua em $q = 1\ \mu C$, ao ser deslocada de A para C.

Solução:

a) A ddp entre dois pontos de um campo uniforme é dada por $U = Ed$.
Sendo $U = V_A - V_B$ com $V_A = 100$ V, $V_B = 80$ V e $d = 0,1$ m, vem:

$$V_A - V_B = Ed \Rightarrow 100 - 80 = E \cdot 0,1 \Rightarrow \boxed{E = 200 \text{ V/m}}$$

b) Para o cálculo do potencial elétrico no ponto C (V_C), podemos novamente usar $U = Ed$ entre os pontos B e C. Sendo $V_B = 80$ V, $E = 200$ V/m e $d = 0,2$ m, vem:

$$V_B - V_C = Ed \Rightarrow 80 - V_C = 200 \cdot 0,2 \Rightarrow \boxed{V_C = 40 \text{ V}}$$

Observe que, embora os pontos B e C não estejam na mesma linha de força, podemos aplicar $U = Ed$, lembrando que d é a distância entre as superfícies equipotenciais que passam por B e C.

c) O trabalho da força elétrica que atua em q no deslocamento de A até C é dado por $\mathcal{T}_{AC} = q(V_A - V_C)$. Sendo $q = 1\ \mu\text{C} = 10^{-6}$ C, $V_A = 100$ V e $V_C = 40$ V, vem:

$$\mathcal{T}_{AC} = 10^{-6} \cdot (100 - 40) \Rightarrow \boxed{\mathcal{T}_{AC} = 6 \cdot 10^{-5} \text{ J}}$$

Resposta: a) 200 V/m; b) 40 V; c) $6 \cdot 10^{-5}$ J

R. 28 Na figura representamos as superfícies equipotenciais planas, paralelas e igualmente espaçadas de um campo elétrico uniforme.

a) Determine a ddp entre os pontos A e B.

b) Represente algumas linhas de força desse campo e determine sua intensidade.

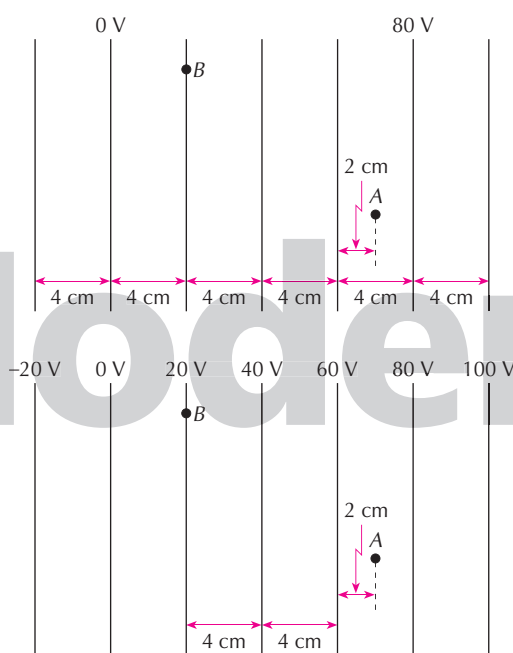
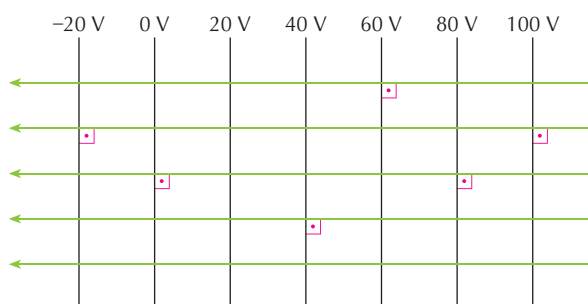
Solução:

a) Como o campo elétrico é uniforme e a distância entre duas superfícies equipotenciais sucessivas é constante, temos a distribuição de potenciais indicada na figura ao lado.

Assim, o ponto A tem potencial elétrico $V_A = 70$ V e o ponto B, $V_B = 20$ V.

A ddp U entre A e B será:

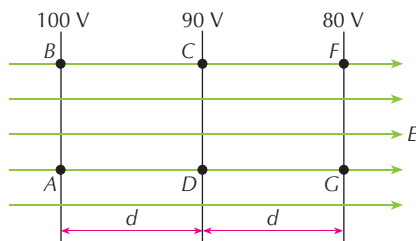
$U = V_A - V_B \Rightarrow U = 70\text{ V} - 20\text{ V} \Rightarrow$

$\Rightarrow \boxed{U = 50 \text{ V}}$

b) As linhas de força são perpendiculares às superfícies equipotenciais e têm sentido dos potenciais decrescentes.

Cálculo da intensidade do campo:

De $U = Ed$, sendo $U = 50$ V e $d = 10$ cm $= 0,10$ m a distância entre as superfícies equipotenciais que passam por A e B, vem:

$$50 = E \cdot 0,10 \Rightarrow \boxed{E = 5,0 \cdot 10^2 \text{ V/m}}$$

Resposta: a) 50 V; b) $5,0 \cdot 10^2$ V/m

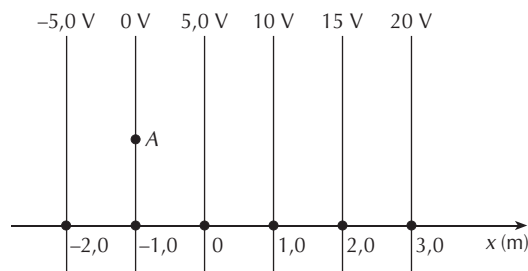
P. 51 São dadas as linhas de força e as superfícies equipotenciais de um campo elétrico uniforme de intensidade $E = 10^5$ V/m.

Determine:

a) a distância d;

b) a ddp entre os pontos A e F;

c) o trabalho da força elétrica que atua em $q = 1$ μC ao ser levada de A até C pelo caminho $A \rightarrow D \rightarrow G \rightarrow F \rightarrow C$;

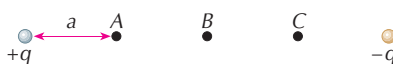
d) a energia potencial elétrica que $q = 1$ μC adquire ao ser colocada em B.

P. 52 (FEI-SP) A figura indica a posição dos planos equipotenciais numa região de um campo elétrico uniforme. Uma partícula de massa $m = 4{,}0 \cdot 10^{-7}$ kg e carga $q = 2{,}0 \cdot 10^{-6}$ C é abandonada em repouso no ponto A ($x = -1{,}0$ m).

Determine:

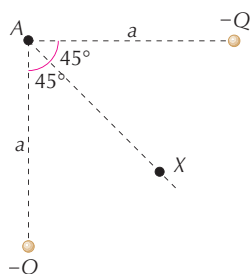
a) a intensidade, a direção e o sentido do vetor campo elétrico;

b) a velocidade da partícula após um deslocamento de 2,0 m.

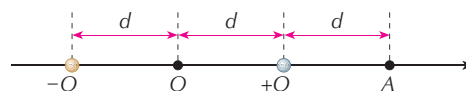
EXERCÍCIOS PROPOSTOS DE RECAPITULAÇÃO

P. 53 (Unifei-MG) Considere a figura a seguir, onde q e $-q$ são cargas elétricas puntiformes que distam $4a$ uma da outra. As distâncias entre os pontos (A e B) e (B e C) valem a. A constante eletrostática do meio é k_0.

a) Determine para o ponto B o potencial V_B e o vetor campo elétrico $\vec{E}_B$.

b) Determine a diferença de potencial entre os pontos B e A e C e B.

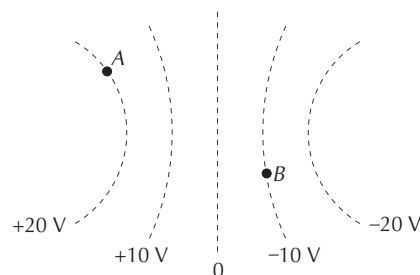
P. 54 (Fuvest-SP) Duas cargas elétricas puntiformes $-Q$ distam a do ponto A, conforme indicado na figura.

a) A que distância de A sobre a reta $\overleftrightarrow{AX}$ devemos colocar uma outra carga elétrica puntiforme $+Q$ para que o potencial elétrico em A seja nulo?

b) É esse o único ponto do plano da figura em que a carga $+Q$ pode ser colocada para anular o potencial em A? Justifique a resposta.

P. 55 (Fuvest-SP) São dadas duas cargas elétricas puntuais $+Q$ e $-Q$ de mesmo módulo, situadas como mostra a figura. Sabe-se que o potencial elétrico no ponto A vale 5,0 V, considerando-se nulo o potencial no infinito.

Determine o trabalho realizado pelo campo elétrico quando se desloca uma carga pontual $q = 1{,}0$ nC $= 1{,}0 \cdot 10^{-9}$ C:

a) do infinito até o ponto A;

b) do ponto A até o ponto O.

P. 56 (Fuvest-SP) A figura representa algumas superfícies equipotenciais de um campo eletrostático e os valores dos potenciais correspondentes.

a) Represente o vetor campo elétrico nos pontos A e B.

b) Qual o trabalho realizado pelo campo para levar uma carga q, de $2 \cdot 10^{-6}$ C, do ponto A ao ponto B?

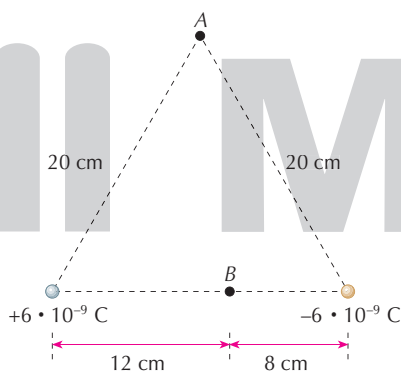
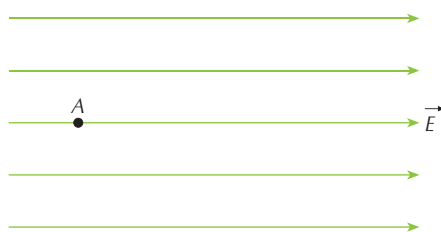
P. 57 Uma carga elétrica puntiforme $q = 3 \cdot 10^{-9}$ C é levada de um ponto *A* de um campo elétrico, onde o potencial é $V_A = 900$ V, até um ponto *B* do referido campo, onde o potencial é $V_B = 2.100$ V.

a) A carga ganhou ou perdeu energia potencial elétrica? Quanto?

b) Determine o trabalho da força elétrica que atua em *q*, ao ser deslocada de *A* até *B*.

c) Compare e interprete os resultados obtidos nos itens **a** e **b**.

P. 58 Uma carga elétrica puntiforme $q = 1$ μC é deslocada dentro de um campo elétrico desde um ponto *A*, cujo potencial é $V_A = 40$ V, até um ponto *B*, cujo potencial V_B é desconhecido. Nesse deslocamento, a carga ganhou 20 μJ de energia potencial elétrica. Calcule V_B.

P. 59 Consideremos o campo elétrico criado por duas cargas puntiformes de $+6 \cdot 10^{-9}$ C e $-6 \cdot 10^{-9}$ C fixas a 20 cm do ponto *A* e a 12 cm e 8 cm, respectivamente, do ponto *B*, no vácuo. Qual a energia potencial elétrica que $q = 2 \cdot 10^{-9}$ C adquire ao ser colocada, sucessivamente, nos pontos *A* e *B* da figura? Considere $k_0 = 9 \cdot 10^9 \dfrac{N \cdot m^2}{C^2}$.

P. 60 Uma carga elétrica puntiforme $q = 10^{-6}$ C é abandonada em repouso num ponto *A* de um campo elétrico uniforme de intensidade $E = 10^5$ N/C e cujas linhas de força são horizontais, conforme a figura. Suponha que a única força que atua na partícula seja a elétrica.

a) Determine a intensidade, a direção e o sentido da força elétrica que atua em *q*.

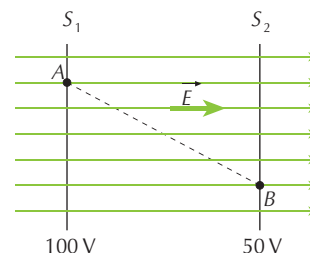
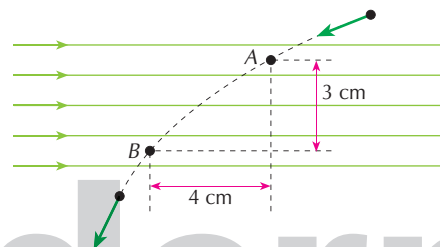
b) Ao passar por um ponto *B* situado a 0,1 m de *A*, a energia potencial elétrica de *q* vale 10^{-3} J. Qual o potencial elétrico em *B*?

c) Qual a ddp dada por $U = V_A - V_B$?

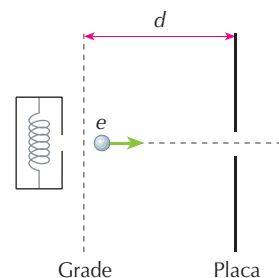
d) Qual a energia potencial elétrica de *q* em *A*?

P. 61 (Unirio-RJ) Com base no esquema, que representa a configuração das linhas de força e das superfícies equipotenciais de um campo elétrico uniforme de intensidade $E = 5 \cdot 10^2$ V/m, determine:

a) a distância entre as superfícies equipotenciais S_1 e S_2;

b) o trabalho da força elétrica que age em $q = 2 \cdot 10^{-6}$ C para esta ser deslocada de *A* para *B*.

P. 62 (Fuvest-SP) Uma partícula eletrizada positivamente com carga $q = 3 \cdot 10^{-15}$ C é lançada em um campo elétrico de intensidade $2 \cdot 10^3$ N/C, descrevendo o movimento representado na figura.

a) Qual a intensidade da força que atua sobre a partícula no interior do campo elétrico?

b) Qual a variação da energia potencial elétrica da partícula entre os pontos *A* e *B*?

P. 63 (Vunesp) Os elétrons de um feixe de um tubo de TV são emitidos por um filamento de tungstênio dentro de um compartimento com baixíssima pressão. Esses elétrons, com carga de módulo $e = 1{,}6 \times 10^{-19}$ C, são acelerados por um campo elétrico existente entre uma grade plana e uma placa, separadas por uma distância $d = 12{,}0$ cm e polarizadas com uma diferença de potencial $U = 15$ kV. Passam então por um orifício da placa e atingem a tela do tubo. A figura ilustra esse dispositivo.

Considerando que a velocidade inicial dos elétrons é nula, calcule:

a) o campo elétrico entre a grade e a placa, considerando que ele seja uniforme;

b) a energia cinética de cada elétron, em joules, quando passa pelo orifício.

TESTES PROPOSTOS

T. 56 (UFTM-MG) Com relação a um ponto *P* sobre as linhas de campo geradas por uma única carga puntiforme positiva, analise:

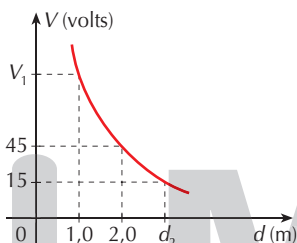
I. a força elétrica exercida sobre uma carga nesse ponto tem a direção da linha de força que passa pelo ponto *P*;

II. o vetor campo elétrico nesse ponto tem sentido voltado para a carga geradora do campo;

III. o potencial elétrico em *P* é um vetor com direção radial à carga geradora do campo.

Está correto o contido em:

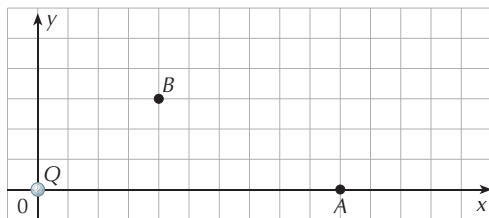
a) I, apenas
b) II, apenas
c) III, apenas
d) I e II, apenas
e) I, II e III

T. 57 (Fameca-SP) O gráfico representa o potencial gerado por uma carga elétrica puntiforme, em função da distância dessa carga aos pontos do campo elétrico. O meio é o vácuo.

Dado: constante eletrostática do vácuo

$k_0 = 9{,}0 \cdot 10^9 \dfrac{N \cdot m^2}{C^2}$

O potencial elétrico V_1 e a distância d_2, que podem ser obtidos a partir do gráfico, e a carga Q que gera o potencial, assumem os seguintes valores:

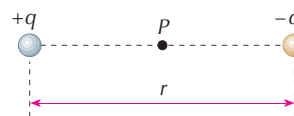
a) $V_1 = 180$ V; $d_2 = 6{,}0$ m; $Q = 1{,}0 \cdot 10^{-8}$ C
b) $V_1 = 90$ V; $d_2 = 6{,}0$ m; $Q = 2{,}0 \cdot 10^{-8}$ C
c) $V_1 = 90$ V; $d_2 = 3{,}5$ m; $Q = 1{,}0 \cdot 10^{-8}$ C
d) $V_1 = 180$ V; $d_2 = 3{,}5$ m; $Q = 2{,}0 \cdot 10^{-8}$ C
e) $V_1 = 90$ V; $d_2 = 6{,}0$ m; $Q = 1{,}0 \cdot 10^{-8}$ C

T. 58 (UCSal-BA) Considere uma carga puntiforme positiva Q, fixa na origem 0 de um sistema de eixos cartesianos, e dois pontos *A* e *B* desse plano, como mostra a figura.

No ponto *B*, o vetor campo elétrico tem intensidade *E* e o potencial elétrico é *V*. No ponto *A*, os valores dessas grandezas serão, respectivamente:

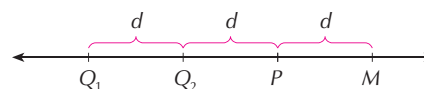
a) $\dfrac{E}{4}$ e $\dfrac{V}{2}$
b) $\dfrac{E}{2}$ e $\dfrac{V}{2}$
c) E e V
d) 2E e 2V
e) 4E e 2V

T. 59 (Mackenzie-SP) Num ponto *A* do Universo, constata-se a existência de um campo elétrico $\vec{E}$ de intensidade $9{,}0 \cdot 10^5$ N/C, devido exclusivamente a uma carga puntiforme Q situada a 10 cm dele. Num outro ponto *B*, distante 30 cm da mesma carga, o vetor campo elétrico tem intensidade $1{,}0 \cdot 10^5$ N/C. A ddp entre *A* e *B* é:

a) $1{,}8 \cdot 10^4$ V
b) $2{,}0 \cdot 10^4$ V
c) $6{,}0 \cdot 10^4$ V
d) $6{,}0 \cdot 10^5$ V
e) $8{,}0 \cdot 10^5$ V

T. 60 (Olimpíada Brasileira de Física) Duas cargas puntiformes $+q$ e $-q$, localizadas no vácuo, estão separadas por uma distância fixa *r*, como ilustrado na figura abaixo.

O ponto *P* está localizado na posição média entre as duas cargas. Identifique a alternativa correta.

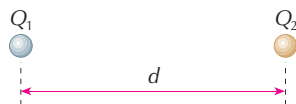
a) A força elétrica resultante sobre uma carga colocada no ponto *P* é zero.
b) O campo elétrico resultante no ponto *P* é zero.
c) O potencial elétrico resultante no ponto *P* é zero.
d) Como temos duas cargas de mesmo módulo e sinais contrários, o valor do campo elétrico ao longo da reta que as une é constante.
e) Como temos duas cargas de mesmo módulo e sinais contrários, o valor do potencial elétrico ao longo da reta que as une é zero.

T. 61 (PUC-SP) Duas cargas pontuais Q_1 e Q_2, respectivamente iguais a $+2{,}0$ μC e $-4{,}0$ μC, estão fixas na reta representada na figura, separadas por uma distância *d*.

Qual é o módulo de uma terceira carga pontual Q_3, a ser fixada no ponto *P* de modo que o campo elétrico resultante da interação das 3 cargas no ponto *M* seja nulo?

a) 2,0 μC
b) 3,0 μC
c) $\dfrac{7{,}0}{9}$ μC
d) $\dfrac{7{,}0}{4}$ μC
e) $\dfrac{14}{7}$ μC

T. 62 (PUC-MG) Quatro cargas puntiformes iguais, positivas, estão nos vértices de um quadrado. O potencial foi considerado nulo a uma distância infinita. É **correto**, então, dizer que no centro do quadrado:

a) o potencial é diferente de zero e o campo elétrico é nulo.
b) o potencial é nulo e o campo elétrico é diferente de zero.
c) o potencial e o campo elétrico são ambos diferentes de zero.
d) o potencial e o campo elétrico são ambos nulos.

T. 63 (UEM-PR) Duas cargas elétricas pontuais Q_1 e Q_2, de mesmo módulo e de sinais desconhecidos, estão fixas no espaço e separadas por uma distância d, como mostra a figura a seguir.

Sabendo-se que a carga Q_1 exerce uma força F_1 sobre a carga Q_2 e que a carga Q_2 exerce uma força F_2 sobre a carga Q_1, é correto afirmar que:

(01) os sentidos das forças F_1 e F_2 serão opostos somente quando as cargas tiverem sinais opostos;

(02) os sentidos das forças F_1 e F_2 serão sempre opostos, quaisquer que sejam os sinais das cargas;

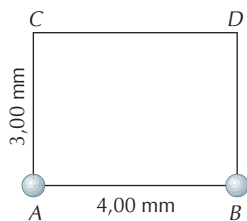
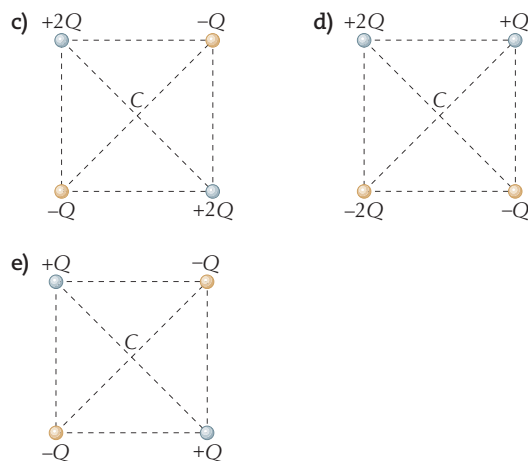
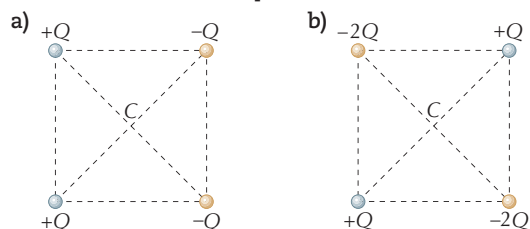
(04) o campo elétrico é nulo em $\frac{d}{2}$, o ponto médio da distância entre as duas cargas, somente se as cargas tiverem sinais iguais;

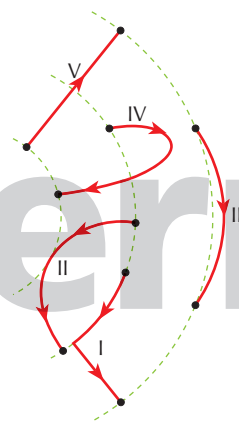
(08) o potencial elétrico é nulo em $\frac{d}{2}$, o ponto médio da distância entre as duas cargas, não importando quais sejam os sinais das cargas;

(16) colocando-se uma terceira carga Q_3 negativa em $\frac{d}{2}$, o ponto médio da distância entre as duas cargas, a força resultante sobre essa carga será nula somente se Q_1 e Q_2 tiverem sinais iguais.

Dê como resposta a soma dos números que precedem as afirmativas corretas.

T. 64 (Mackenzie-SP) Nos vértices A e B do retângulo ilustrado a seguir estão fixas as cargas elétricas puntiformes $Q_A = 3{,}0 \cdot 10^{-2}$ μC e $Q_B = 6{,}0 \cdot 10^{-2}$ μC, respectivamente. Considerando que o evento ocorre no vácuo ($k_0 = 9 \cdot 10^9$ N $\cdot$ m^2/C^2) e que o potencial elétrico de referência corresponde ao de um ponto muito distante, a diferença de potencial elétrico entre os pontos C e D é:

a) zero
b) $9{,}0 \cdot 10^4$ V
c) $-9{,}0 \cdot 10^4$ V
d) $3{,}6 \cdot 10^4$ V
e) $-3{,}6 \cdot 10^4$ V

T. 65 (Unip-SP) Quatro partículas eletrizadas estão fixas nos vértices de um quadrado. As partículas têm as cargas elétricas indicadas nas figuras. Identifique a opção em que o potencial elétrico e o vetor campo elétrico, no centro C do quadrado, são ambos nulos.

a)
b)
c)
d)
e)
T. 66 (Unifesp) Na figura, as linhas tracejadas representam superfícies equipotenciais de um campo elétrico; as linhas cheias I, II, III, IV e V representam cinco possíveis trajetórias de uma partícula de carga q, positiva, realizadas entre dois pontos dessas superfícies, por um agente externo que realiza trabalho mínimo. A trajetória em que esse trabalho é maior, em módulo, é:

a) I
b) II
c) III
d) IV
e) V

T. 67 (Mackenzie-SP) Ao abandonarmos um corpúsculo, eletrizado positivamente com carga elétrica de 2,0 μC, no ponto A de um campo elétrico, ele fica sujeito a uma força eletrostática que o leva para o ponto B, após realizar o trabalho de 6,0 μJ. A diferença de potencial elétrico entre os pontos A e B desse campo elétrico é:

a) 1,5 kV
b) 3,0 kV
c) 4,5 kV
d) 6,0 kV
e) 7,5 kV

T. 68 (UEM-PR) Considere uma carga elétrica, positiva, isolada no vácuo ($k_0 = 9 \cdot 10^9$ N $\cdot$ m^2/C^2), cujo módulo é $q = 12$ μC. Assinale o que for correto.

(01) Em qualquer ponto em torno da carga q, as linhas de força têm a mesma direção e o mesmo sentido do vetor campo elétrico gerado por ela.

(02) A intensidade do campo elétrico gerado pela carga q, em um ponto situado a 5 cm de distância, é igual a $4{,}32 \cdot 10^7$ N/C.

(04) O potencial elétrico no ponto situado a 5 cm de distância da carga é igual a $2{,}16 \cdot 10^6$ V.

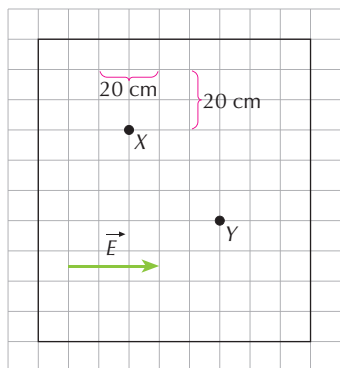
(08) A diferença de potencial elétrico entre dois pontos situados em uma mesma superfície equipotencial é diferente de zero.

(16) O trabalho realizado pela força elétrica do campo elétrico para deslocar uma carga $q_2 = 15\ \mu C$ desde o infinito até o ponto situado a 5 cm da carga q é, em módulo, igual a 32,40 J.

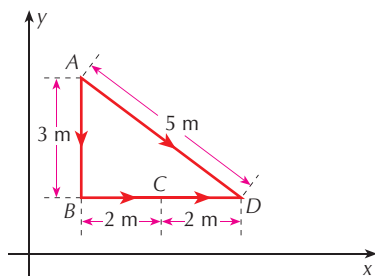
(32) O trabalho realizado pela força elétrica do campo elétrico para deslocar uma carga entre dois pontos pertencentes à mesma linha de força é nulo.

(64) Potencial elétrico e trabalho são grandezas vetoriais.

Dê como resposta a soma dos números que precedem as afirmativas corretas.

T. 69 (UEL-PR) O esquema representa uma região onde existe um campo elétrico uniforme $\vec{E}$.

Sabendo-se que o módulo de $\vec{E}$ vale 200 N/C, a diferença de potencial entre os pontos X e Y, indicados no esquema, é, em volts, igual a:

a) zero **b)** 18 **c)** 60 **d)** 80 **e)** 120

T. 70 (UEL-PR) Em uma região existe um campo elétrico uniforme, cuja direção pertence ao plano xy. Um agente externo desloca com movimentos uniformes uma carga q igual a 0,5 C, conforme a figura abaixo.

Sabendo-se que o agente externo não efetua trabalho sobre a carga q no trajeto AB, mas efetua um trabalho igual a 2 J no trajeto BC e 4 J no trajeto AD, é correto afirmar:

a) O campo elétrico nesta região tem módulo $E = 2$ V/m, direção do eixo x e sentido positivo.

b) O campo elétrico nesta região tem módulo $E = 2$ V/m, direção do eixo x e sentido negativo.

c) O campo elétrico nesta região tem módulo $E = 4$ V/m, direção do eixo x e sentido negativo.

d) O campo elétrico nesta região tem módulo $E = 4$ V/m, direção do eixo y e sentido positivo.

e) O campo elétrico nesta região tem módulo $E = 2$ V/m, direção do eixo y e sentido negativo.

T. 71 (Uniube-MG) Em uma região de campo elétrico uniforme de intensidade $E = 20.000$ N/C, uma carga $q = 4 \cdot 10^{-8}$ C é levada de um ponto A, onde $V_A = 200$ V, para um ponto B, onde $V_B = 80$ V. O trabalho realizado pela força elétrica no deslocamento da carga entre A e B e a distância entre os pontos A e B são, respectivamente, iguais a:

a) $4,8 \cdot 10^{-6}$ N e $6 \cdot 10^{-3}$ m

b) $4,8 \cdot 10^{-6}$ J e $6 \cdot 10^{-3}$ m

c) $2,4 \cdot 10^{-5}$ J e $8 \cdot 10^{-3}$ m

d) $2,4 \cdot 10^{-5}$ N e $6 \cdot 10^{-3}$ m

e) 0 e $8 \cdot 10^{-3}$ m

T. 72 (UEM-PR) O campo elétrico entre duas placas condutoras vale $E = 2,0 \times 10^4$ N/C e a distância entre elas é $d = 7,0$ mm. Suponha que um elétron ($q_e = -1,6 \times 10^{-19}$ C e $m_e = 9,1 \times 10^{-31}$ kg) seja liberado em repouso nas proximidades da placa negativa. O campo gravitacional é considerado desprezível. Com base na situação descrita, assinale o que for correto.

(01) A força $\vec{F}$ que atuará sobre o elétron terá a mesma direção e sentido do campo elétrico.

(02) O módulo da força $\vec{F}$ que atuará sobre o elétron é igual a $3,2 \times 10^{-15}$ N.

(04) Sabendo que o peso do elétron é desprezível em comparação com a força elétrica que atuará sobre ele, pode-se afirmar que o movimento do elétron será retilíneo uniformemente variado e que o módulo da aceleração adquirida por ele é, aproximadamente, $3,5 \times 10^{15}$ m/s².

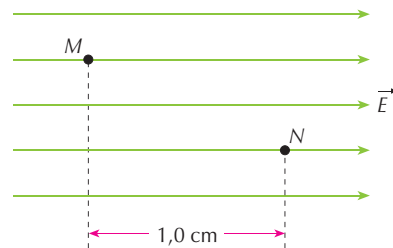
(08) O tempo que o elétron gastará para ir de uma placa a outra será $4,0 \times 10^{-9}$ s.

(16) A velocidade do elétron ao chegar à placa positiva é $14,0 \times 10^6$ m/s.

(32) A diferença de potencial entre as placas é 140 V.

(64) O trabalho que o campo elétrico realiza sobre o elétron, ao deslocá-lo da placa negativa para a placa positiva, é $2,24 \times 10^{-18}$ N · m.

Dê como resposta a soma dos números que precedem as afirmativas corretas.

T. 73 (PUC-Campinas-SP) Considere dois pontos M e N, de um campo elétrico uniforme de intensidade $5,0 \cdot 10^3$ N/C, conforme mostra o esquema a seguir.

Sabendo que o potencial elétrico no ponto M vale 40 V, é correto afirmar que:

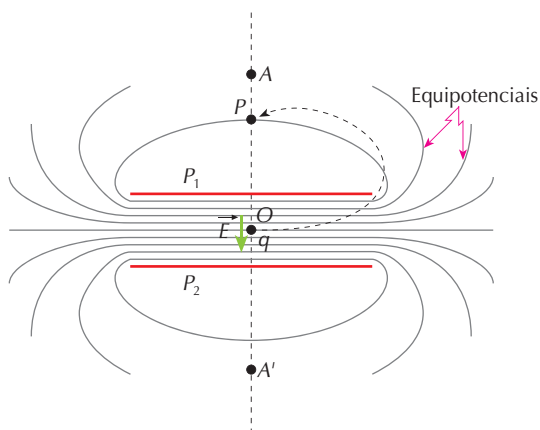
a) o potencial elétrico no ponto N vale −10 V.

b) o trabalho do campo elétrico ao deslocar uma carga $q = 2,0 \cdot 10^{-6}$ C, de M até N, vale $-2,0 \cdot 10^{-4}$ J.

c) o potencial elétrico no ponto N vale 40 V.

d) o trabalho do campo elétrico ao deslocar uma carga $q = 2,0 \cdot 10^{-6}$ C, de M até N, vale $2,0 \cdot 10^{-4}$ J.

e) o potencial elétrico do ponto N vale 90 V.

T. 74 (Fuvest-SP) Seja o sistema formado por duas placas planas P_1 e P_2 eletrizadas com cargas elétricas de sinais opostos e separadas de 10 mm entre si. Na figura, são mostradas as interseções das placas P_1 e P_2 e de algumas superfícies equipotenciais com o plano do papel. Ao longo do eixo médio AA', o campo elétrico é uniforme entre as placas e seu valor é $E = 10^5$ V/m. As superfícies equipotenciais indicadas estão igualmente espaçadas de 1 mm ao longo do eixo. Uma carga $q = 10^{-14}$ C é levada do ponto O ao ponto P, indicados na figura.

O trabalho realizado é:

a) 0 J
b) $5 \cdot 10^{-12}$ J
c) $1 \cdot 10^{-11}$ J
d) $4 \cdot 10^{-12}$ J
e) $1 \cdot 10^{-10}$ J

T. 75 (E. Naval-RJ) Uma partícula eletrizada, possuindo carga elétrica positiva igual a $+2{,}0 \cdot 10^{-9}$ C e massa igual a $1{,}0 \cdot 10^{-10}$ kg, é abandonada do repouso num ponto P de um campo elétrico uniforme, horizontal e de módulo igual a 400 V/m. Desprezando-se a ação gravitacional, a perda de energia potencial no deslocamento de 4,0 m até um outro ponto Q é:

a) $32 \cdot 10^{-7}$ J
b) $16 \cdot 10^{-7}$ J
c) $8 \cdot 10^{-7}$ J
d) $32 \cdot 10^{-9}$ J
e) $16 \cdot 10^{-6}$ J

T. 76 (Uesb-BA) Uma partícula permanece em repouso em um campo elétrico vertical e dirigido para cima, produzido entre duas placas paralelas e horizontais, igualmente carregadas com cargas de sinais opostos e distantes 2 cm. Se a partícula em questão possui massa igual a $4 \cdot 10^{-13}$ kg e carga positiva $2{,}5 \cdot 10^{-18}$ C, a diferença do potencial V, em 10^4 volts, entre as placas, é:

a) 1,3
b) 1,8
c) 2,6
d) 3,2
e) 3,8

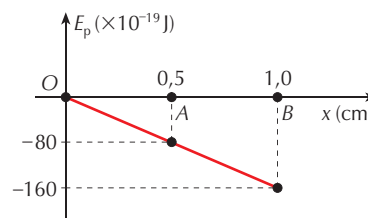
(Dado: $g = 10$ m/s²)

T. 77 (ITA-SP) Um pêndulo simples é construído com uma esfera metálica de massa $m = 1{,}0 \cdot 10^{-4}$ kg carregada com uma carga elétrica de $3{,}0 \cdot 10^{-5}$ C e um fio isolante de comprimento $L = 1{,}0$ m de massa desprezível. Esse pêndulo oscila com período T num local em que $g = 10{,}0$ m/s². Quando um campo elétrico uniforme e constante $\vec{E}$ é aplicado verticalmente em toda região do pêndulo, o seu período dobra de valor. A intensidade do campo elétrico $\vec{E}$ é de:

a) $6{,}7 \cdot 10^3$ N/C
b) 42 N/C
c) $6{,}0 \cdot 10^{-6}$ N/C
d) 33 N/C
e) 25 N/C

EXERCÍCIOS ESPECIAIS *de trabalho e potencial elétrico*

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

R. 29 É dado o diagrama da energia potencial E_p de um elétron, no vácuo, submetido apenas à ação de um campo elétrico uniforme e paralelo ao eixo x; em $x = 0$, a energia cinética do elétron é nula. Determine a energia cinética do elétron em $x = 0{,}5$ cm.

Solução:

No campo elétrico, há conservação da energia total, isto é, a energia cinética mais a energia potencial elétrica é constante:

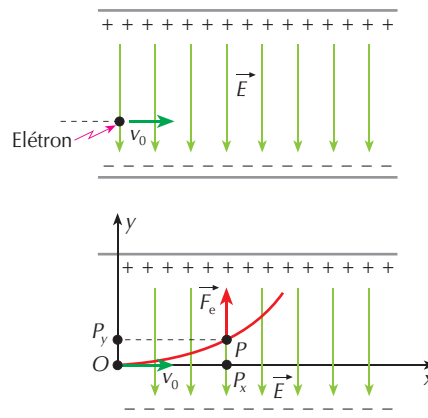
$$E_{c(O)} + E_{p(O)} = E_{c(A)} + E_{p(A)} \quad ①$$

em que: $E_{c(O)}$ = energia cinética em O = zero (dado); $E_{p(O)}$ = energia potencial em O = zero (do gráfico); $E_{p(A)}$ = energia potencial em A = $-80 \cdot 10^{-19}$ J (do gráfico); $E_{c(A)}$ = energia cinética em A (incógnita).

Substituindo em ①, temos:

$$0 + 0 = E_{c(A)} + (-80 \cdot 10^{-19}) \Rightarrow \boxed{E_{c(A)} = +80 \cdot 10^{-19} \text{ J}}$$

Resposta: $80 \cdot 10^{-19}$ J

R. 30 Têm-se duas placas paralelas, planas e horizontais, entre as quais se estabelece um campo elétrico uniforme de intensidade E, direção vertical e sentido descendente. Um feixe de elétrons penetra horizontalmente nesse campo com velocidade v_0. Sendo dados: E, v_0, m (massa do elétron), e (carga do elétron em valor absoluto), determine a equação da trajetória dos elétrons. Despreze as ações gravitacionais.

Solução:

A força $\vec{F}_e$ tem sentido ascendente, pois a carga do elétron é negativa. Portanto, a trajetória do elétron será desviada para cima.

Em vez de estudarmos o movimento do elétron P ao longo da trajetória, estudemos os movimentos de P_x (projeção de P no eixo x) e de P_y (projeção de P no eixo y). $\vec{F}_e$ é vertical, portanto sua projeção no eixo x é nula, isto é, $F_{e(x)} = 0$. Sendo $F_{e(x)} = ma_x = 0$, resulta $a_x = 0$, isto é, o ponto P_x executa movimento retilíneo uniforme. A projeção de $\vec{F}_e$ no eixo y é $F_{e(y)} = F_e$.

Sendo $F_e = ma_y = eE$, resulta $a_y = \dfrac{eE}{m}$ constante, isto é, o ponto P_y executa movimento retilíneo uniformemente variado. As funções horárias dos movimentos componentes são:

$$x = v_0 t \quad \text{e} \quad y = \frac{1}{2} \cdot \frac{eE}{m} \cdot t^2$$

Para a determinação da equação da trajetória $y = f(x)$, eliminamos o tempo t nas duas equações anteriores.

$$x = v_0 t \Rightarrow t = \frac{x}{v_0} \text{ e } y = \frac{1}{2} \cdot \frac{eE}{m} t^2 \Rightarrow y = \frac{1}{2} \cdot \frac{eE}{m} \cdot \frac{x^2}{v_0^2} \Rightarrow \boxed{y = \left(\frac{eE}{2mv_0^2}\right) \cdot x^2}$$

Obtemos, assim, uma equação do tipo $y = kx^2$, com $k = \dfrac{eE}{2mv_0^2}$ constante, que representa uma parábola.

Resposta: $y = \left(\dfrac{eE}{2mv_0^2}\right) \cdot x^2$

R. 31 No campo da carga $Q = 2\ \mu C$, considere dois pontos A e B pertencentes a uma mesma linha de força e que distam 0,1 m e 0,2 m, respectivamente, de Q. Com que velocidade se deve lançar do ponto B uma pequena esfera de carga $q = 10^{-8}$ C e massa $m = 0{,}2$ g, para que atinja A com velocidade nula?

O meio é o vácuo e desprezam-se as ações gravitacionais. É dada a constante eletrostática do vácuo: $k_0 = 9 \cdot 10^9 \dfrac{N \cdot m^2}{C^2}$.

Solução:

Neste exercício, **a força elétrica é variável** e, portanto, não podemos aplicar a equação de Torricelli, válida para o MUV (produzido por forças constantes).

Assim, devemos aplicar o teorema da energia cinética entre B e A:

$$\mathcal{T}_{BA} = E_{c(A)} - E_{c(B)}$$

em que $E_{c(A)} = \dfrac{mv_A^2}{2}$ é a energia cinética de q em A, $E_{c(B)} = \dfrac{mv_B^2}{2}$ é a energia cinética de q em B e $\mathcal{T}_{BA} = q(V_B - V_A)$.

Portanto: $q(V_B - V_A) = \dfrac{mv_A^2}{2} - \dfrac{mv_B^2}{2}$

Sendo $k_0 = 9 \cdot 10^9 \dfrac{N \cdot m^2}{C^2}$, $Q = 2\mu C = 2 \cdot 10^{-6}$ C e $d_A = 0{,}1$ m, o potencial elétrico V_A vale:

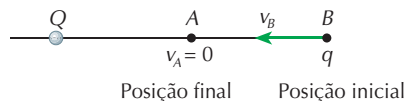
$$V_A = k_0 \cdot \frac{Q}{d_A} \Rightarrow V_A = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{2 \cdot 10^{-6}}{0{,}1} \Rightarrow V_A = 18 \cdot 10^4 \text{ V}$$

Como a distância de Q a B é $d_B = 0{,}2$ m, o potencial elétrico V_B vale:

$$V_B = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{2 \cdot 10^{-6}}{0{,}2} \Rightarrow V_B = 9 \cdot 10^4 \text{ V}$$

Sendo $m = 0{,}2 \text{ g} = 0{,}2 \cdot 10^{-3}$ kg, $q = 10^{-8}$ C e $v_A = 0$, pois a carga q deve atingir A com velocidade nula, podemos determinar a velocidade v_B de lançamento:

$$q(V_B - V_A) = \frac{mv_A^2}{2} - \frac{mv_B^2}{2} \Rightarrow 10^{-8} \cdot (9 \cdot 10^4 - 18 \cdot 10^4) = 0 - \frac{0{,}2 \cdot 10^{-3} \cdot v_B^2}{2} \Rightarrow \boxed{v_B = 3 \text{ m/s}}$$

Resposta: 3 m/s

Dispositivos eletrostáticos

Além das copiadoras xerográficas, descritas no capítulo 1 (página 37), há diversos outros dispositivos que utilizam princípios eletrostáticos em seu funcionamento. Estão nessa situação as coifas eletrostáticas (presentes em cozinhas industriais) e os filtros eletrostáticos (usados, por exemplo, no escapamento de alguns veículos automotores), além da impressora a jato de tinta, uma das mais utilizadas nos computadores.

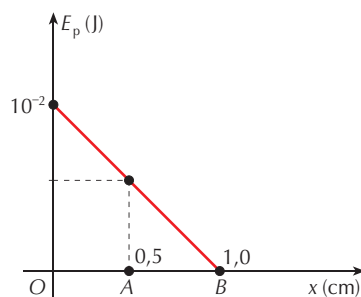
Nas coifas e nos filtros eletrostáticos, as impurezas resultantes do processo de combustão são direcionadas, por um sistema de ventilação, para um elemento ionizador, que as eletriza. As partículas, agora dotadas de carga elétrica, atravessam o precipitador, onde um campo elétrico desvia as partículas, provocando sua precipitação sobre uma superfície e impedindo sua dispersão para o meio ambiente. Periodicamente, as partículas são removidas da superfície onde se depositam.

Nas impressoras a jato de tinta, o líquido é previamente pulverizado e as gotículas formadas são encaminhadas inicialmente para um elemento ionizador, onde adquirem carga elétrica. Em seguida, as gotas atravessam uma região onde existe um campo elétrico uniforme entre duas pequenas placas metálicas. As gotículas sofrem então a deflexão e atingem o papel nos locais adequados, determinando a impressão do texto.

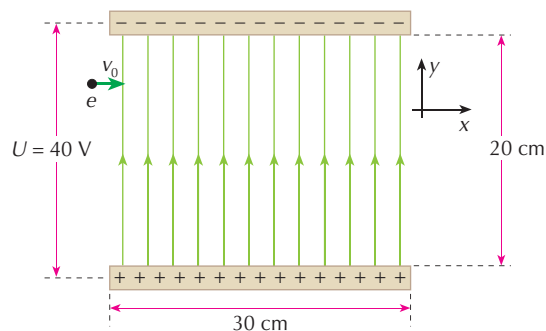
Filtro eletrostático usado em automóveis.

Entre na rede No endereço eletrônico http://fem.um.es/Fislets/CD/II4Electromagnetismo/II19CampoElectrico/default.html, em 19.4 Ilustración (acesso em julho/2009), você pode analisar, mediante uma simulação, o movimento de uma carga ao atravessar um campo elétrico.

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

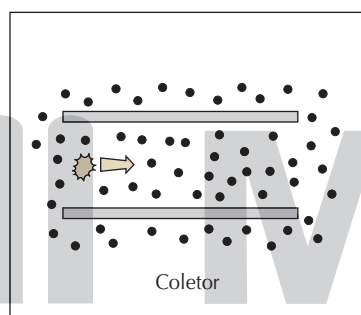
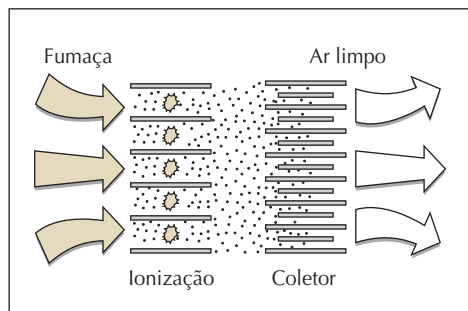
P. 64 É dado o gráfico da energia potencial de uma carga $q = 10^{-5}$ C, no vácuo, submetida apenas à ação de um campo elétrico uniforme e paralelo ao eixo x. Em $x = 0$, a energia cinética de q é nula.

a) Determine a energia cinética que q possui nos pontos A ($x = 0{,}5$ cm) e B ($x = 1{,}0$ cm).

b) Construa os gráficos da energia cinética em função de x e da energia total em função de x.

P. 65 (Olimpíada Brasileira de Física) Duas placas metálicas paralelas, separadas de 20 cm no vácuo, são submetidas a uma diferença de potencial de $U = 40$ V. Considere um elétron penetrando entre as placas com velocidade $v_0 = 4 \cdot 10^6$ m/s, paralela às placas, conforme ilustra a figura. A distância do elétron à placa negativa, quando penetra no campo elétrico, é 5 cm. Despreze as ações gravitacionais.

a) Calcule a força elétrica sobre o elétron.

b) Determine se o elétron consegue escapar das placas ou não.

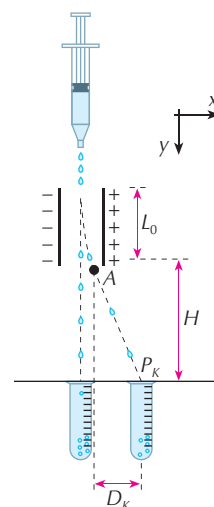
(Dados: carga do elétron $= -1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C; massa do elétron $= 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ kg)

P. 66 (Unicamp-SP) A fumaça liberada no fogão durante a preparação de alimentos apresenta gotículas de óleo com diâmetros entre 0,05 μm e 1 μm. Uma das técnicas possíveis para reter essas gotículas de óleo é utilizar uma coifa eletrostática, cujo funcionamento é apresentado no esquema a seguir: a fumaça é aspirada por uma ventoinha, forçando sua passagem através de um estágio de ionização, onde as gotículas de óleo adquirem carga elétrica. Essas gotículas carregadas são conduzidas para um conjunto de coletores formados por placas paralelas, com um campo elétrico entre elas, e precipitam-se nos coletores.

a) Qual a massa das maiores gotículas de óleo? Considere a gota esférica, a densidade do óleo $\rho_{óleo} = 9{,}0 \cdot 10^2$ kg/m³ e $\pi = 3$.

b) Quanto tempo a gotícula leva para atravessar o coletor? Considere a velocidade do ar arrastado pela ventoinha como sendo 0,6 m/s e o comprimento do coletor igual a 0,30 m.

c) Uma das gotículas de maior diâmetro tem uma carga de $8 \cdot 10^{-19}$ C (equivalente à carga de apenas 5 elétrons!). Essa gotícula fica retida no coletor para o caso ilustrado na figura? A diferença de potencial entre as placas é de 50 V, e a distância entre as placas do coletor é de 1 cm. Despreze os efeitos do atrito e da gravidade.

(Dados: carga do elétron $= -1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C; massa do elétron $= 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ kg)

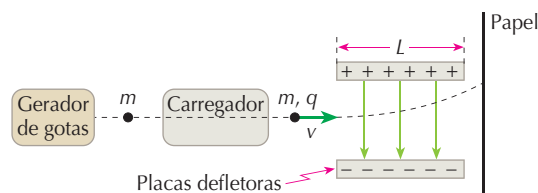
P. 67 (Fuvest-SP) Um selecionador eletrostático de células biológicas produz, a partir da extremidade de um funil, um jato de gotas com velocidade V_{0y} constante. As gotas, contendo as células que se quer separar, são eletrizadas. As células selecionadas, do tipo K, em gotas de massa M e eletrizadas com carga $-Q$, são desviadas por um campo elétrico uniforme E, criado por duas placas paralelas carregadas, de comprimento L_0. Essas células são recolhidas no recipiente colocado em P_K, como na figura a seguir.

Para as gotas contendo células do tipo K, utilizando em suas respostas apenas Q, M, E, L_0, H e V_{0y}, determine:

a) a aceleração horizontal A_x dessas gotas, quando elas estão entre as placas;

b) a componente horizontal V_x da velocidade com que essas gotas saem, no ponto A, da região entre as placas;

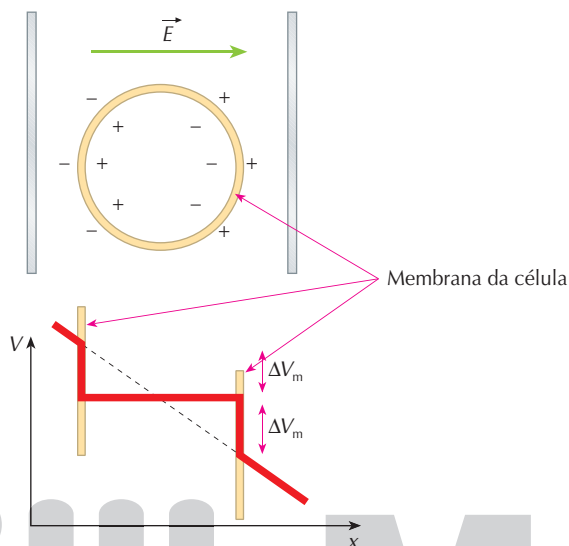
c) a distância D_K, indicada no esquema, que caracteriza a posição em que essas gotas devem ser recolhidas.

(Nas condições dadas, os efeitos gravitacionais podem ser desprezados.)

P. 68 (Unicamp-SP) Nas impressoras jato de tinta, os caracteres são feitos a partir de minúsculas gotas de tinta que são arremessadas contra a folha de papel. O ponto no qual as gotas atingem o papel é determinado eletrostaticamente. As gotas são inicialmente formadas e depois carregadas eletricamente. Em seguida, elas são lançadas com velocidade constante v em uma região onde existe um campo elétrico uniforme entre duas pequenas placas metálicas. O campo deflete as gotas conforme a figura abaixo.

O controle da trajetória é feito escolhendo-se convenientemente a carga de cada gota. Considere uma gota típica com massa $m = 1{,}0 \cdot 10^{-10}$ kg, carga elétrica $q = -2{,}0 \cdot 10^{-13}$ C, velocidade horizontal $v = 6{,}0$ m/s, atravessando uma região de comprimento $L = 8{,}0 \cdot 10^{-3}$ m, onde há um campo elétrico $E = 1{,}5 \cdot 10^6$ N/C. Dado: $g = 10$ m/s².

a) Determine a razão $\frac{F_e}{F_P}$ entre os módulos da força elétrica e da força peso que atuam sobre a gota de tinta.

b) Calcule a componente vertical da velocidade da gota após atravessar a região com campo elétrico.

P. 69 (Unicamp-SP) A durabilidade dos alimentos é aumentada por meio de tratamentos térmicos, como no caso do leite longa vida. Esses processos térmicos matam os micro-organismos, mas provocam efeitos colaterais indesejáveis. Um dos métodos alternativos é o que utiliza campos elétricos pulsados, provocando a variação de potencial através da célula, como ilustrado na figura a seguir. A membrana da célula de um micro-organismo é destruída se uma diferença de potencial de $\Delta V_m = 1$ V é estabelecida no interior da membrana, conforme a figura.

a) Sabendo que o diâmetro de uma célula é de 1 μm, qual é a intensidade do campo elétrico que precisa ser aplicado para destruir a membrana?
b) Qual é o ganho de energia, em eV, de um elétron que atravessa a célula sob a tensão aplicada?

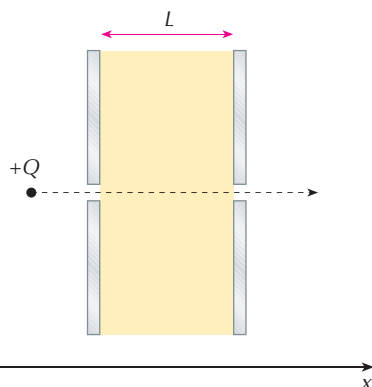
P. 70 Uma carga elétrica $Q = 2 \cdot 10^{-6}$ C gera, no vácuo, um campo elétrico.
Sejam A e B pontos do campo.
É dada a constante eletrostática do vácuo:

$k_0 = 9 \cdot 10^9 \, \frac{N \cdot m^2}{C^2}$

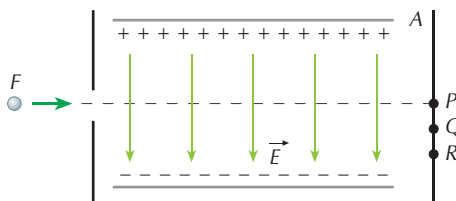
Desprezando as ações gravitacionais, determine:
a) os potenciais elétricos em A e B;
b) o trabalho da força elétrica que atua em $q = 10^{-4}$ C, quando é levada de A para B;
c) o trabalho da força elétrica que atua em $q = 10^{-4}$ C, quando é levada de A até o infinito;
d) a velocidade com que a carga $q = 10^{-4}$ C e massa $m = 2 \cdot 10^{-2}$ kg deve ser lançada de B para atingir A com velocidade nula;
e) a maior velocidade atingida pela carga $q = 10^{-4}$ C e massa $m = 2 \cdot 10^{-2}$ kg, se for abandonada em repouso em A.

P. 71 Tem-se uma carga $+Q$ fixa. Outra carga $-q$ de massa m executa movimento circular uniforme de centro $+Q$ e raio R. Desprezando-se as ações gravitacionais e supondo o vácuo como meio, de constante eletrostática k_0, determine:
a) a velocidade v de $-q$;
b) a energia potencial elétrica de $-q$;
c) a energia cinética de $-q$;
d) a energia total de $-q$;
e) a relação entre a energia total e a cinética;
f) a energia E que se deve fornecer a $-q$, para que passe a executar MCU, em torno de $+Q$, com raio $2R$.

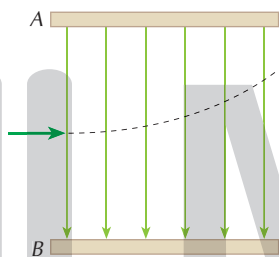
TESTES PROPOSTOS

T. 78 (Unifesp) Uma carga positiva Q em movimento retilíneo uniforme, com energia cinética W, penetra em uma região entre duas placas paralelas eletrizadas, como ilustrado na figura.

Mantendo o movimento retilíneo, em direção perpendicular às placas, ela sai por outro orifício na placa oposta com velocidade constante e energia cinética reduzida para $\frac{W}{4}$ devido à ação do campo elétrico entre as placas. Se as placas estão separadas por uma distância L, pode-se concluir que o campo elétrico entre as placas tem módulo:

a) $\frac{3W}{4QL}$ e aponta no sentido do eixo x.
b) $\frac{3W}{4QL}$ e aponta no sentido contrário a x.
c) $\frac{W}{2QL}$ e aponta no sentido do eixo x.
d) $\frac{W}{2QL}$ e aponta no sentido contrário a x.
e) $\frac{W}{4QL}$ e aponta no sentido do eixo x.

T. 79 (Fuvest-SP) Uma fonte F emite partículas (elétrons, prótons e nêutrons) que são lançadas no interior de uma região onde existe um campo elétrico uniforme.

As partículas penetram perpendicularmente às linhas de força do campo. Três partículas emitidas atingem o anteparo A nos pontos P, Q e R. Podemos afirmar que essas partículas eram, respectivamente:

a) elétron, nêutron e próton.
b) próton, nêutron e elétron.
c) elétron, próton e próton.
d) nêutron, elétron e elétron.
e) nêutron, próton e próton.

T. 80 (Uerj) Uma partícula carregada penetra em um campo elétrico uniforme existente entre duas placas planas e paralelas A e B. A figura mostra a trajetória curvilínea descrita pela partícula.

A alternativa que aponta a causa correta dessa trajetória é:

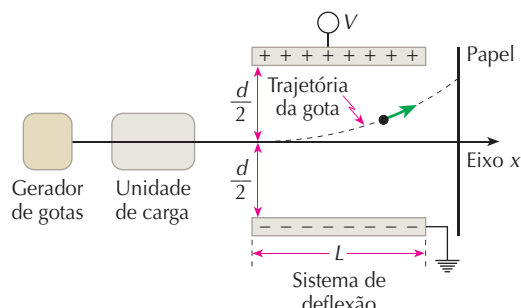
a) A partícula tem carga negativa, e a placa A tem carga positiva.
b) A partícula tem carga positiva, e a placa A tem carga negativa.
c) A partícula tem carga negativa, e a placa B tem carga positiva.
d) A partícula tem carga positiva, e a placa B tem carga negativa.

T. 81 (Acafe-SC) A tabela mostra as energias cinéticas final e inicial, respectivamente, nos pontos A e B de um campo elétrico, para três cargas q_1, q_2 e q_3.

Energia cinética inicial (J)	Energia cinética final (J)	Carga (μC)
0,40	0,95	q_1
0,15	0,70	q_2
0,35	0,75	q_3

Sabendo-se que a ddp nos três casos é a mesma, a relação entre as três cargas é:

a) $q_1 < q_2 < q_3$
b) $q_1 = q_2 = q_3$
c) $q_1 > q_2 > q_3$
d) $q_1 = q_2 > q_3$
e) $q_1 > q_2 = q_3$

T. 82 (UFG-GO) Em uma impressão jato de tinta, as letras são formadas por pequenas gotas de tinta que incidem sobre o papel. A figura a seguir mostra os principais elementos desse tipo de impressora. As gotas, após serem eletrizadas na unidade de carga, têm suas trajetórias modificadas no sistema de deflexão (placas carregadas), atingindo o papel em posições que dependem de suas cargas elétricas. Suponha que uma gota, de massa m e de carga elétrica q, entre no sistema de deflexão com velocidade v_0 ao longo do eixo x. Considere a diferença de potencial, V, entre as placas, o comprimento, L, das placas e a distância, d, entre elas.

Se a gota descrever a trajetória mostrada na figura, pode-se afirmar que:

(01) o módulo de sua aceleração é $\frac{qV}{md}$;
(02) $\frac{L}{v_0}$ é o tempo necessário para ela atravessar o sistema de deflexão;
(04) sua carga elétrica é positiva;
(08) ocorre um aumento de sua energia potencial elétrica;

Dê como resposta a soma dos números que precedem as afirmações corretas.

T. 83 (UFPI) Uma partícula, com carga elétrica $q = 2 \cdot 10^{-9}$ C, é liberada do repouso numa região onde existe um campo elétrico externo. Após se afastar alguns centímetros da posição inicial, a partícula já adquiriu uma energia cinética, dada por $E_c = 4 \cdot 10^{-6}$ J. Qual a diferença de potencial ($\Delta V = V_f - V_i$) entre essas duas posições?

a) -2 kV
b) -4 kV
c) 0
d) $+4$ kV
e) $+2$ kV

T. 84 (PUC-SP) Um elétron-volt (eV) é, por definição, a energia cinética adquirida por um elétron quando acelerado, a partir do repouso, por uma diferença de potencial de 1,0 V. Considerando a massa do elétron $9{,}0 \cdot 10^{-31}$ kg e sua carga elétrica em valor absoluto $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C, a velocidade do elétron com energia cinética 1,0 eV tem valor aproximado de:

a) $6{,}0 \cdot 10^5$ m/s
b) $5{,}0 \cdot 10^5$ m/s
c) $4{,}0 \cdot 10^5$ m/s
d) $5{,}0 \cdot 10^4$ m/s
e) $6{,}0 \cdot 10^4$ m/s

UNIDADE A

Capítulo 4

Condutores em equilíbrio eletrostático. Capacitância eletrostática

Os elétrons livres de um condutor metálico, em equilíbrio eletrostático, encontram-se em movimento desordenado.

No caso de um raio atingir um avião em pleno voo, os passageiros nada sofrerão. Isso é explicado pelo fato de a fuselagem do avião se comportar como uma blindagem eletrostática, em que as cargas em excesso se distribuem na superfície condutora, mantendo nulo o campo elétrico interno. Na foto, vemos um teste em pequena escala, onde o protótipo recebe uma descarga elétrica gerada por 1.500.000 volts para comprovação do fenômeno.

Seção 4.1

Propriedades dos condutores em equilíbrio eletrostático

Objetivos

- Compreender o conceito de condutor em equilíbrio eletrostático.
- Conhecer as propriedades de um condutor em equilíbrio eletrostático.
- Analisar a distribuição das cargas elétricas em excesso de um condutor em equilíbrio eletrostático.
- Analisar o campo e o potencial elétricos gerados por um condutor esférico.
- Conceituar a densidade elétrica superficial e particularizar para o caso de um condutor esférico.

Termos e conceitos

- **elétrons livres**
- **poder das pontas**
- **efeito corona**

Um condutor, eletrizado ou não, encontra-se em **equilíbrio eletrostático** quando nele **não ocorre movimento ordenado** de cargas elétricas em relação a um referencial fixo no condutor (**fig. 1**).

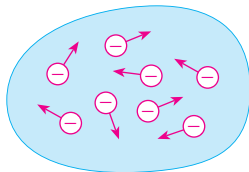



Figura 1. Condutor metálico em equilíbrio eletrostático: seus elétrons livres encontram-se em movimento desordenado.

Um condutor em equilíbrio eletrostático apresenta as propriedades que são mostradas a seguir.

> O **campo elétrico** resultante nos pontos internos do condutor é **nulo**.

Se nos pontos internos do condutor o campo não fosse nulo, ele atuaria nos elétrons livres, colocando-os em movimento ordenado. Isso contraria a hipótese de o condutor estar em equilíbrio eletrostático.

> O **potencial elétrico** em todos os pontos internos e superficiais do condutor é **constante**.

Se entre dois pontos quaisquer do condutor houvesse uma diferença de potencial, os elétrons livres estariam em movimento ordenado, deslocando-se para as regiões de maior potencial. Isso contraria a hipótese de o condutor estar em equilíbrio eletrostático.

O valor do potencial em todos os pontos de um condutor em equilíbrio eletrostático é chamado **potencial elétrico do condutor**.

Afirmar que o potencial elétrico de um condutor é 1.000 V significa que, em cada ponto dele, o potencial assume esse valor (**fig. 2**).

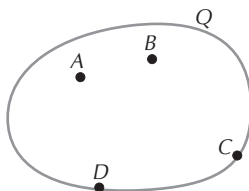



Figura 2. Condutor eletrizado com carga Q em equilíbrio eletrostático. Todos os seus pontos apresentam mesmo potencial: $V_A = V_B = V_C = V_D$.

Se todos os pontos de um condutor em equilíbrio eletrostático têm o mesmo potencial, concluímos que, em particular, sua superfície é equipotencial.

Como as linhas de força são perpendiculares às superfícies equipotenciais e o vetor campo elétrico é tangente à linha de força (**fig. 3**), decorre a propriedade:

> Nos **pontos da superfície** de um condutor em equilíbrio eletrostático, o **vetor campo elétrico** tem direção **perpendicular** à superfície.

Figura 3. Em cada ponto da superfície o vetor campo elétrico tem direção perpendicular à superfície.

1 Distribuição das cargas elétricas em excesso num condutor em equilíbrio eletrostático

Considere um condutor eletrizado e em equilíbrio eletrostático. Nessas condições, o condutor possui, além dos prótons e elétrons que normalmente se neutralizam, um excesso de cargas elétricas positivas ou negativas.

Como as cargas em excesso têm mesmo sinal, elas se repelem, tendendo a manter-se o mais distante possível umas das outras. O maior afastamento entre as cargas, sem que saiam do condutor, determina a sua distribuição pela superfície externa do condutor (**fig. 4**).

> As **cargas elétricas em excesso** de um condutor em equilíbrio eletrostático **distribuem-se por sua superfície externa**.

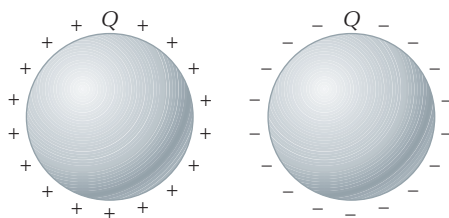



Figura 4. As cargas em excesso distribuem-se pela superfície externa do condutor.

2 Campo e potencial de um condutor esférico

Considere um condutor esférico, de raio R, eletrizado com carga elétrica Q (**fig. 5**).

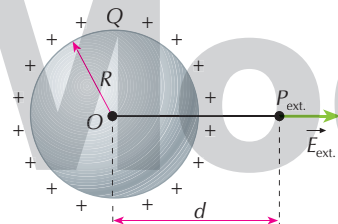



Figura 5. Condutor esférico eletrizado.

Para os pontos externos à esfera, a intensidade do campo e o potencial são calculados como se a **carga Q fosse puntiforme e estivesse localizada no centro da esfera**.

Assim, supondo o condutor no vácuo, cuja constante eletrostática é k_0, e sendo d a distância do centro O da esfera ao ponto externo ($P_{ext.}$), temos:

$$E_{ext.} = k_0 \cdot \frac{|Q|}{d^2} \quad \text{e} \quad V_{ext.} = k_0 \cdot \frac{Q}{d}; \text{ adotando o referencial no infinito}$$

Para o cálculo da intensidade do campo em um ponto externo à esfera, mas infinitamente próximo a ela (**fig. 6**), a distância d pode ser substituída pelo próprio raio R. Desse modo, temos:

$$E_{próx.} = k_0 \cdot \frac{|Q|}{R^2}$$

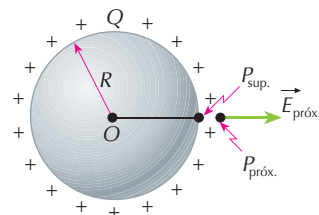



Figura 6. $P_{próx.}$: ponto externo e infinitamente próximo; $P_{sup.}$: ponto da superfície.

Ao se passar de um ponto externo infinitamente próximo ($P_{próx.}$) para um ponto localizado na superfície ($P_{sup.}$), a intensidade do campo elétrico tem seu valor reduzido à metade (**fig. 7**):

$$E_{sup.} = \frac{E_{próx.}}{2} = \frac{1}{2} \cdot k_0 \cdot \frac{|Q|}{R^2}$$

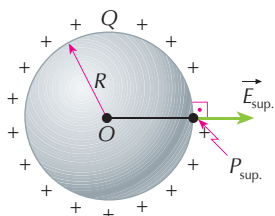



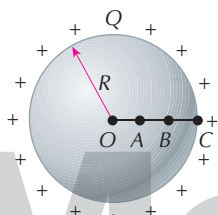
Figura 7. A intensidade do campo num ponto da superfície é igual à metade da intensidade num ponto próximo:

$$E_{sup.} = \frac{E_{próx.}}{2}$$

Nos pontos internos do condutor, já sabemos que o campo elétrico é nulo. O potencial elétrico é constante em todos os pontos (internos e superficiais) do condutor (**fig. 8**). Esse valor comum, adotando-se o referencial no infinito, é dado por:

$$V = k_0 \cdot \frac{Q}{R}$$

Figura 8.

$E_O = E_A = E_B = 0$

$V_O = V_A = V_B = V_C = k_0 \cdot \frac{Q}{R}$

Nas **figuras 9 e 10** temos os gráficos da intensidade do campo e do potencial elétrico em função da distância, contada a partir do centro O.

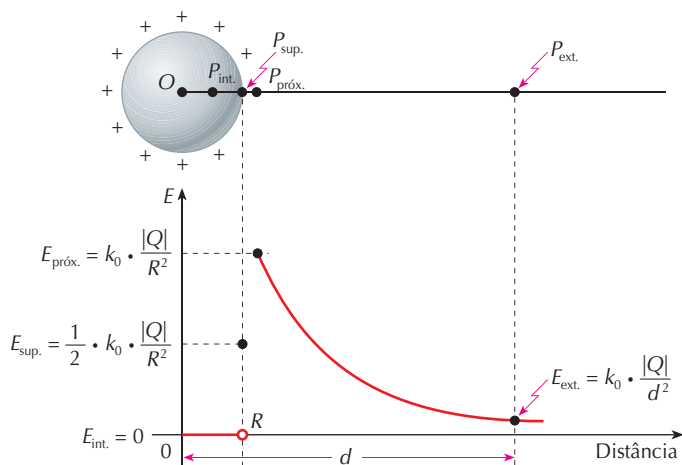



Figura 9.

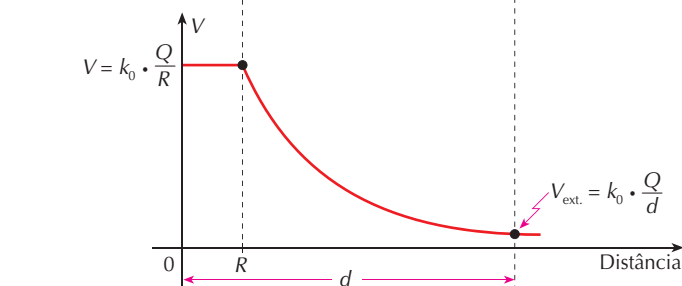



Figura 10.

3 Densidade elétrica superficial

Considere um elemento de superfície de área ΔA de um condutor, no qual se localiza a carga ΔQ (**fig. 11**).

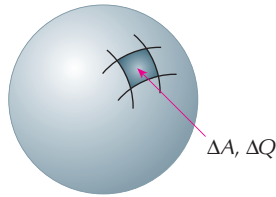



Figura 11.

A densidade elétrica superficial média σ é dada por:

$$\sigma = \frac{\Delta Q}{\Delta A}$$

Num condutor esférico de raio R, isolado e eletrizado com carga Q, por questões de simetria, Q distribui-se uniformemente pela superfície. Nesse caso, temos:

$$\sigma = \frac{Q}{4\pi R^2}$$

em que $4\pi R^2$ é a área da superfície esférica.

Considere um condutor eletrizado e em equilíbrio eletrostático, com a forma indicada na **figura 12**. A região de menor raio de curvatura, mais pontiaguda, apresenta maior densidade elétrica superficial, isto é, nela ocorre maior concentração de cargas. Em torno dessa região, o campo elétrico é mais intenso. Em consequência, as cargas podem escoar dela para o ambiente com maior facilidade.

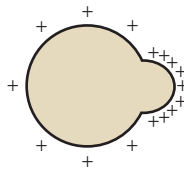
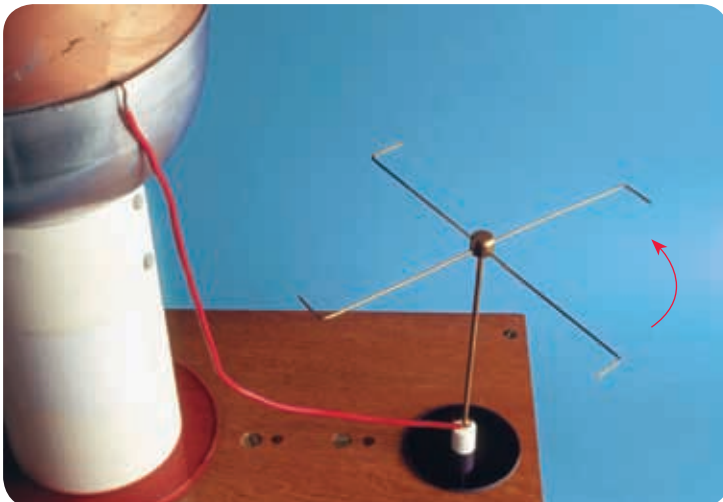



Figura 12. Condutor dotado de uma ponta, em equilíbrio eletrostático.

A essa propriedade dá-se o nome de **poder das pontas**. É comum observar-se, nas proximidades da ponta, uma luminosidade devida à ionização do ar. A esse fenômeno dá-se o nome de **efeito corona**.

Torniquete elétrico. O intenso campo elétrico na vizinhança das pontas provoca a ionização do ar. Os íons, de mesmo sinal que a ponta, são repelidos por ela (vento elétrico) e, pelo princípio da ação e reação, repelem a ponta, produzindo a rotação do torniquete.

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

R. 32 É dada uma esfera condutora de raio $R = 1$ m, eletrizada e situada no vácuo. Em um ponto P à distância $d = 3$ m do centro da esfera, o campo elétrico tem intensidade $9 \cdot 10^{-2}$ V/m. Determine:

a) a carga elétrica Q, distribuída pela superfície da esfera, admitindo $Q > 0$;
b) o potencial elétrico no ponto P à distância $d = 3$ m do centro;
c) o potencial elétrico em qualquer ponto interno e da superfície;
d) a intensidade do campo elétrico num ponto da superfície;
e) a intensidade do campo elétrico num ponto externo e bem próximo à superfície.
(Dado: $k_0 = 9 \cdot 10^9$ unidades do SI)

Solução:

a) A intensidade do campo num ponto externo é calculada como se a carga Q fosse puntiforme e estivesse localizada no centro da esfera.

Assim: $E_{ext.} = k_0 \cdot \dfrac{|Q|}{d^2}$

Sendo $E_{ext.} = 9 \cdot 10^{-2}$ V/m, $d = 3$ m, podemos calcular Q, com $Q > 0$:

$$9 \cdot 10^{-2} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{|Q|}{3^2} \Rightarrow |Q| = 9 \cdot 10^{-11}\ \text{C} \Rightarrow \boxed{Q = 9 \cdot 10^{-11}\ \text{C}}$$

b) O potencial elétrico num ponto externo também é calculado como se a carga fosse puntiforme e estivesse no centro da esfera:

$$V_{ext.} = k_0 \cdot \frac{Q}{d} \Rightarrow V_{ext.} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{9 \cdot 10^{-11}}{3} \Rightarrow \boxed{V_{ext.} = 2{,}7 \cdot 10^{-1}\ \text{V}}$$

c) O potencial elétrico em todos os pontos internos e da superfície do condutor é constante e vale:

$$V = k_0 \cdot \frac{Q}{R} \Rightarrow V = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{9 \cdot 10^{-11}}{1} \Rightarrow \boxed{V = 8{,}1 \cdot 10^{-1}\ \text{V}}$$

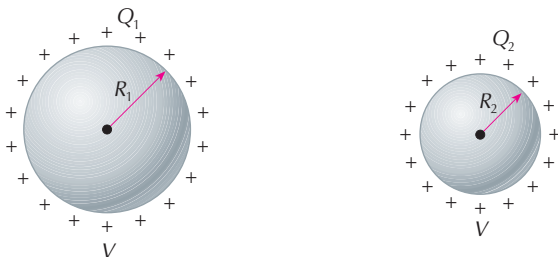
d) Num ponto da superfície o vetor campo elétrico tem intensidade:

$$E_{sup.} = \frac{1}{2} \cdot k_0 \cdot \frac{|Q|}{R^2} \Rightarrow E_{sup.} = \frac{1}{2} \cdot 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{9 \cdot 10^{-11}}{1^2} \Rightarrow \boxed{E_{sup.} = 4{,}05 \cdot 10^{-1}\ \text{V/m}}$$

e) Num ponto externo e bem próximo à superfície o campo tem intensidade igual ao dobro da intensidade na superfície, ou seja:

$$E_{próx.} = 2\,E_{sup.} \Rightarrow \boxed{E_{próx.} = 8{,}1 \cdot 10^{-1}\ \text{V/m}}$$

Resposta: a) $9 \cdot 10^{-11}$ C; b) $2{,}7 \cdot 10^{-1}$ V; c) $8{,}1 \cdot 10^{-1}$ V; d) $4{,}05 \cdot 10^{-1}$ V/m; e) $8{,}1 \cdot 10^{-1}$ V/m

R. 33 Considere dois condutores esféricos de raios R_1 e R_2 com $R_1 > R_2$ e eletrizados, respectivamente, com cargas Q_1 e Q_2. Vamos supor que os condutores estejam afastados e submetidos ao mesmo potencial V. Qual deles apresenta maior densidade elétrica superficial?

Solução:

As esferas apresentam mesmo potencial V, que é dado por:

$$V = k_0 \cdot \frac{Q_1}{R_1} = k_0 \cdot \frac{Q_2}{R_2} \Rightarrow \frac{Q_1}{R_1} = \frac{Q_2}{R_2} \quad ①$$

A densidade elétrica superficial σ é dada pelo quociente da carga pela área:

$$\sigma_1 = \frac{Q_1}{4\pi R_1^2} \quad ② \qquad \text{e} \qquad \sigma_2 = \frac{Q_2}{4\pi R_2^2} \quad ③$$

De ①, ② e ③ resulta: $\boxed{\sigma_1 R_1 = \sigma_2 R_2}$

Sendo $R_1 > R_2$, temos: $\sigma_2 > \sigma_1$

Resposta: A esfera de raio menor apresenta densidade elétrica superficial maior. Isto é, a concentração de cargas é maior na esfera de menor raio.

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

P. 72 Uma superfície esférica condutora, de raio $R = 2$ m, no vácuo, é suposta isolada de outros corpos. Em um ponto P à distância $d = 8$ m do centro da superfície, o campo elétrico por ela estabelecido tem intensidade $E = 8 \cdot 10^{-2}$ V/m. Determine o potencial elétrico V_0 e a intensidade do campo elétrico E_0 no centro da esfera. Considere positiva a carga da superfície esférica.

P. 73 Uma esfera condutora de raio $R = 2$ m está positivamente eletrizada e situada no vácuo. À distância $d = 6$ m de seu centro, o vetor campo elétrico tem intensidade $E = 2{,}5 \cdot 10^{-2}$ V/m.

Sendo $k_0 = 9 \cdot 10^9 \frac{N \cdot m^2}{C^2}$, determine:

a) o valor da carga elétrica que se distribui pela superfície da esfera;
b) o potencial elétrico no ponto referido;
c) o potencial elétrico na superfície da esfera e nos pontos internos dela;
d) a intensidade do vetor campo elétrico num ponto da superfície da esfera;
e) a intensidade do vetor campo elétrico num ponto externo bem próximo à superfície.

P. 74 Uma esfera metálica de raio $R = 40$ cm está em equilíbrio eletrostático no vácuo, eletrizada com carga $Q = 8\ \mu$C. Calcule a intensidade do vetor campo elétrico:
a) nos pontos internos da esfera;
b) num ponto externo e extremamente próximo da superfície;
c) nos pontos da superfície da esfera;
d) num ponto situado a 5 m do centro da esfera.

Considere $k_0 = 9 \cdot 10^9 \frac{N \cdot m^2}{C^2}$.

P. 75 Retomando o exercício anterior, determine o valor do potencial elétrico:
a) nos pontos internos da esfera e nos pontos de sua superfície;
b) num ponto situado a 5 m do centro da esfera.

P. 76 Uma esfera metálica de raio $R = 50$ cm está uniformemente eletrizada com carga positiva $Q = 25\ \mu$C. Estando ela no vácuo $\left(k_0 = 9 \cdot 10^9 \frac{N \cdot m^2}{C^2}\right)$, determine:
a) seu potencial elétrico;
b) sua densidade elétrica superficial.
(Dado: área da superfície esférica $= 4\pi R^2$)

P. 77 (Fuvest-SP) Uma esfera condutora de raio $R = 1{,}6$ cm, inicialmente neutra, tem massa igual a 2,13225 g quando medida numa balança eletrônica digital de grande precisão.
a) Qual a menor quantidade de elétrons que seria necessário fornecer a essa esfera para que a balança pudesse registrar o respectivo acréscimo de massa? Despreze eventuais interações elétricas com outros corpos.
b) Supondo a esfera neutra, qual a quantidade de elétrons que deve ser retirada dessa esfera para que o potencial elétrico, em seu interior, seja de 0,90 V?

$\left(\text{Dados: massa do elétron} \simeq 1{,}0 \cdot 10^{-31} \text{ kg; carga do elétron} = -1{,}6 \cdot 10^{-19} \text{ C; } k_0 = 9 \cdot 10^9 \frac{N \cdot m^2}{C^2}\right)$

Seção 4.2

Capacitância eletrostática de um condutor isolado

Objetivos

- Compreender o conceito de capacitância eletrostática de um condutor isolado.
- Conhecer a capacitância eletrostática de um condutor esférico.
- Conhecer a unidade de medida de capacitância eletrostática.
- Analisar a nova distribuição de cargas elétricas e o potencial comum que adquirem, quando condutores eletrizados são colocados em contato.

Termos e conceitos

- **condutor isolado**
- **capacidade eletrostática**
- **condutores em equilíbrio elétrico**

Considere um condutor isolado, inicialmente neutro. Eletrizando-o com carga Q, ele adquire potencial elétrico V; com carga $2Q$, seu potencial elétrico passa a ser $2V$, e assim sucessivamente. Isso significa que a carga Q de um condutor e o seu potencial elétrico V são grandezas diretamente proporcionais.

Sendo Q proporcional a V, podemos escrever:

$$Q = CV$$

em que C é uma constante de proporcionalidade característica do condutor e do meio no qual se encontra.

Quando dois condutores estiverem num mesmo meio e sob mesmo potencial V, armazenará mais cargas elétricas o condutor que tiver o maior valor de C, pois $Q = CV$ (**fig. 13**).

Portanto, a grandeza C mede a capacidade que um condutor possui de armazenar cargas elétricas e recebe o nome de **capacitância** ou **capacidade eletrostática do condutor isolado:**

$$C = \frac{Q}{V}$$

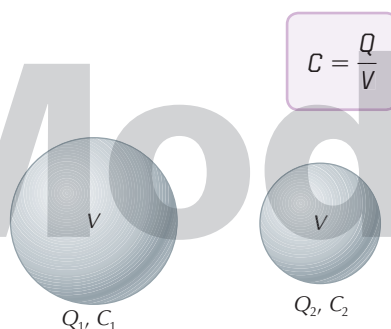



Figura 13. Sob mesmo potencial V, se $C_1 > C_2$, resulta $Q_1 > Q_2$.

1 Capacitância eletrostática de um condutor esférico

Para calcular a capacitância eletrostática de um condutor esférico de raio R, isolado e no vácuo, eletrizemos com carga Q esse condutor. Ele adquirirá potencial elétrico $V = k_0 \cdot \frac{Q}{R}$.

Como $C = \frac{Q}{V}$, temos que:

$$C = \frac{Q}{k_0 \cdot \frac{Q}{R}} \Rightarrow C = \frac{R}{k_0}$$

A capacitância eletrostática de um condutor esférico é diretamente proporcional ao seu raio.

Observe que a capacitância eletrostática C é sempre positiva, não depende da carga ou do potencial do condutor nem do material que o constitui, dependendo somente das dimensões do condutor e do meio no qual se encontra.

Unidade de capacitância eletrostática

Sendo $C = \frac{Q}{V}$, temos: $\text{unidade de capacitância} = \frac{\text{unidade de carga}}{\text{unidade de potencial}}$

No Sistema Internacional de Unidades, temos:

$$\text{unidade de capacitância} = 1\,\frac{\text{coulomb}}{\text{volt}} = 1\text{ farad} = 1\text{ F}$$

O nome **farad** (símbolo **F**), dado à unidade de capacitância, é uma homenagem ao cientista Michael Faraday*.

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

R. 34 Qual deve ser o raio de uma esfera condutora para que no vácuo tenha capacitância igual a 1 F? É dada a constante eletrostática do vácuo $k_0 = 9 \cdot 10^9\,\frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}$.

Solução:

A capacitância eletrostática de um condutor esférico de raio R no vácuo é dada por $C = \frac{R}{k_0}$ e, portanto: $R = k_0 \cdot C$. Sendo $k_0 = 9 \cdot 10^9\,\frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}$ e C = 1 F, temos:

$$R = k_0 \cdot C \Rightarrow R = 9 \cdot 10^9 \cdot 1 \Rightarrow R = 9 \cdot 10^9\text{ m} \Rightarrow \boxed{R = 9 \cdot 10^6\text{ km}}$$

Resposta: Para que a capacitância de um condutor esférico no vácuo seja de 1 F, seu raio deve ser igual a $9 \cdot 10^6$ km (nove milhões de quilômetros, o que corresponde, aproximadamente, a 1.400 vezes o raio da Terra). Isso significa que 1 F é uma capacitância enorme. Daí o uso dos submúltiplos, que são:

1 microfarad = 1 μF = 10^{-6} F; 1 nanofarad = 1 nF = 10^{-9} F; 1 picofarad = 1 pF = 10^{-12} F.

R. 35 Um condutor isolado possui carga elétrica $Q = 10^{-6}$ C e potencial elétrico $V = 10^3$ V. Se sua carga for alterada para $Q' = 1{,}2\ \mu\text{C}$, qual será seu novo potencial V'?

Solução:

Mudando-se a carga, o potencial se altera, mas o quociente entre a carga e o potencial elétrico permanece constante.

Assim: $C = \frac{Q}{V} = \frac{Q'}{V'} \Rightarrow \frac{10^{-6}}{10^3} = \frac{1{,}2 \cdot 10^{-6}}{V'} \Rightarrow \boxed{V' = 1{,}2 \cdot 10^3\text{ V}}$

Resposta: $1{,}2 \cdot 10^3$ V

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

Para os próximos exercícios, considere conhecida a constante eletrostática do vácuo $k_0 = 9 \cdot 10^9\,\frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}$.

P. 78 Considerando a Terra como um condutor esférico imerso no vácuo, calcule sua capacitância eletrostática. Admita o raio da Terra igual a $6{,}3 \cdot 10^6$ m.

P. 79 Um condutor isolado no vácuo possui capacitância eletrostática $C = 10^{-7}$ F. Sabendo-se que o potencial do condutor é $V = 10^4$ V, determine sua carga elétrica. Se o condutor for esférico, qual será o seu raio?

* **FARADAY**, Michael (1791-1867), físico e químico inglês, foi um autodidata. Embora sem educação formal, tornou-se um dos mais brilhantes cientistas do século XIX, destacando-se, na Física, seus trabalhos e descobertas sobre Eletricidade.

2 Equilíbrio elétrico de condutores

Considere três condutores de capacitâncias C_1, C_2 e C_3 eletrizados com cargas Q_1, Q_2 e Q_3 e de potenciais V_1, V_2 e V_3, respectivamente (**fig. 14**). Supondo esses condutores bem afastados, vamos ligá-los por meio de fios condutores de capacitâncias eletrostáticas desprezíveis. A diferença de potencial entre os condutores determina a movimentação de cargas elétricas. Esse fenômeno é transitório, cessando quando os condutores atingem o mesmo potencial, isto é, quando é estabelecido o **equilíbrio elétrico dos condutores**.

Nessas condições, seja V o **potencial comum** e sejam Q_1', Q_2' e Q_3' as **novas cargas** (**fig. 15**).

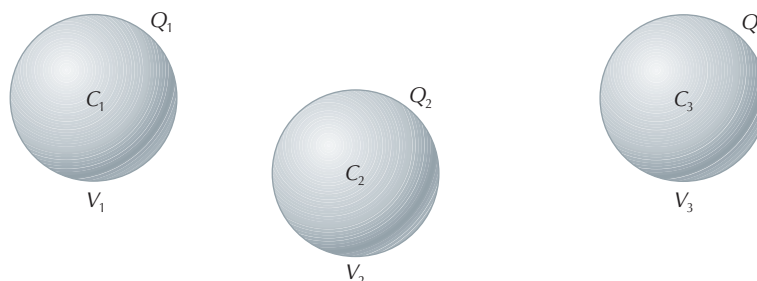



Figura 14. **Condutores afastados.**

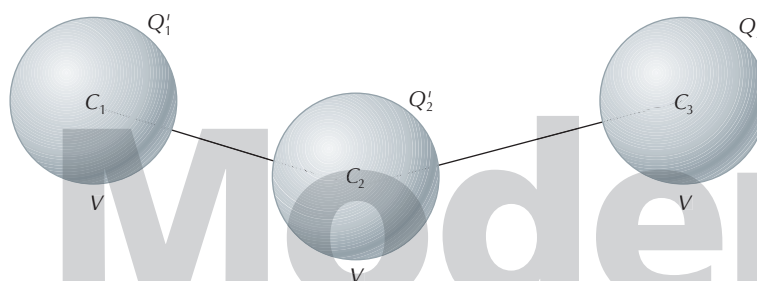



Figura 15. **Após a ligação, o sistema de condutores alcança o equilíbrio eletrostático.**

Pelo princípio da conservação das cargas elétricas temos: $Q_1' + Q_2' + Q_3' = Q_1 + Q_2 + Q_3$

Mas sabemos que: $Q_1' = C_1 \cdot V$; $Q_2' = C_2 \cdot V$; $Q_3' = C_3 \cdot V$

Logo, vem:

$$C_1 \cdot V + C_2 \cdot V + C_3 \cdot V = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

$$V \cdot (C_1 + C_2 + C_3) = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

$$V = \frac{Q_1 + Q_2 + Q_3}{C_1 + C_2 + C_3}$$

Porém, sendo $Q_1 = C_1 \cdot V_1$, $Q_2 = C_2 \cdot V_2$ e $Q_3 = C_3 \cdot V_3$, temos:

$$V = \frac{C_1 \cdot V_1 + C_2 \cdot V_2 + C_3 \cdot V_3}{C_1 + C_2 + C_3}$$

Determinado V, obtemos as novas cargas:

$$Q_1' = C_1 \cdot V; \quad Q_2' = C_2 \cdot V; \quad Q_3' = C_3 \cdot V$$

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

R. 36 Dois condutores, bem afastados, de capacitância $C_1 = 0,01\ \mu F$ e $C_2 = 0,04\ \mu F$, estão eletrizados com cargas $Q_1 = 400\ \mu C$ e $Q_2 = 600\ \mu C$, respectivamente. Ligando-os por meio de um fio metálico, quais serão as novas cargas e o novo potencial dos condutores?

Solução:

O novo potencial é dado por: $V = \dfrac{Q_1 + Q_2}{C_1 + C_2} \Rightarrow V = \dfrac{400 + 600}{0,01 + 0,04} \Rightarrow \boxed{V = 2 \cdot 10^4\ V}$

As novas cargas são:

$Q_1' = C_1V \Rightarrow Q_1' = 0,01 \cdot 2 \cdot 10^4 \Rightarrow \boxed{Q_1' = 200\ \mu C}$

$Q_2' = C_2V \Rightarrow Q_2' = 0,04 \cdot 2 \cdot 10^4 \Rightarrow \boxed{Q_2' = 800\ \mu C}$

Resposta: $Q_1' = 200\ \mu C$, $Q_2' = 800\ \mu C$ e $V = 2 \cdot 10^4\ V$

R. 37 Tem-se dois condutores de raios R_1 e R_2, estando o primeiro eletrizado com carga Q_1 e o segundo, neutro. Ligando-os por meio de um fio metálico, quais serão as novas cargas?

Solução:

O potencial comum após o contato é dado por: $V = \dfrac{Q_1}{C_1 + C_2}$

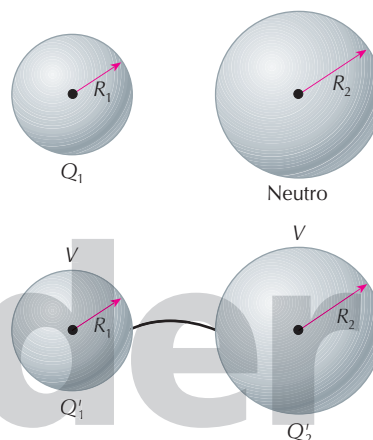
Sendo $Q_1' = C_1V$, temos:

$Q_1' = C_1 \cdot \dfrac{Q_1}{C_1 + C_2} \Rightarrow Q_1' = \dfrac{R_1}{k_0} \cdot \dfrac{Q_1}{\dfrac{R_1}{k_0} + \dfrac{R_2}{k_0}} \Rightarrow \boxed{Q_1' = \dfrac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot Q_1}$

Analogamente: $\boxed{Q_2' = \dfrac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot Q_1}$

Resposta: $Q_1' = \dfrac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot Q_1$ e $Q_2' = \dfrac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot Q_1$

Observações:

- Se $R_1 = R_2$, temos: $Q_1' = Q_2' = \dfrac{Q_1}{2}$. Portanto, se os condutores tiverem mesmo raio, eles terão cargas iguais após o contato.
- Se R_2 for bem maior que R_1, temos: $Q_1' \simeq 0$ e $Q_2' \simeq Q_1$. Esse último resultado nos mostra que, para descarregarmos um condutor ($Q_1' = 0$), basta ligá-lo a outro de raio bem maior. É o que acontece quando ligamos um condutor eletrizado à Terra. Praticamente toda carga do condutor escoa para a Terra.

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

P. 80 São dados três condutores carregados com cargas $Q_1 = 2,0\ \mu C$, $Q_2 = 6,0\ \mu C$ e $Q_3 = 10\ \mu C$, respectivamente, e potenciais $V_1 = 3,0 \cdot 10^3\ V$, $V_2 = 6,0 \cdot 10^3\ V$ e $V_3 = 6,0 \cdot 10^3\ V$, respectivamente. Esses condutores, supostos bem afastados, são ligados por fios metálicos. Uma vez estabelecido o equilíbrio elétrico, determine:

a) o novo potencial comum; **b)** as novas cargas.

P. 81 Três condutores de mesma capacitância C são eletrizados com cargas Q_1, Q_2 e Q_3, respectivamente. Prove que, após o contato, as novas cargas serão iguais. Prove, ainda, que a carga comum é a média aritmética das cargas Q_1, Q_2 e Q_3.

P. 82 Três condutores de mesma capacitância C são eletrizados e adquirem potenciais V_1, V_2 e V_3, respectivamente. Prove que, após o contato, o potencial comum é igual à média aritmética dos potenciais V_1, V_2 e V_3.

V3_P1_UN_A_CAP_04.indd 102 17.09.09 17:35:30

Seção 4.3

A Terra: potencial elétrico de referência

Objetivos

- Analisar o campo elétrico gerado pela Terra.
- Compreender o conceito de potencial elétrico de referência.
- Compreender o conceito de blindagem eletrostática e sua aplicação em situações do cotidiano.

Termos e conceitos

- **blindagem eletrostática**
- **gaiola de Faraday**

É fato experimental que o potencial elétrico aumenta a partir da superfície terrestre no sentido ascendente.

Isso significa que existe um **campo elétrico produzido pela Terra orientado para baixo**. Portanto, em relação à Terra, o vetor campo elétrico $\vec{E}$ é de **aproximação**, o que implica que nela se distribuam cargas elétricas negativas (**fig. 16**). Desse modo, a Terra é considerada um grande condutor carregado e, do ponto de vista da Eletrostática, em equilíbrio. Assim, **em todos os seus pontos**, **o potencial elétrico (V_T) é constante**.

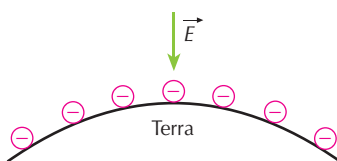



Figura 16. A Terra comporta-se como um grande condutor em equilíbrio eletrostático. Em sua superfície distribuem-se cargas elétricas negativas.

Por exemplo, nos pontos *A* e *B* (**fig. 17**), no interior de uma casa qualquer, o potencial elétrico V_T é o mesmo pelo fato de a casa estar na Terra.

Porém, fixando-se uma carga elétrica puntiforme *Q* em *O* (**fig. 18**), os potenciais em *A* e *B* em relação ao infinito ficam, respectivamente:

(parcela devida a *Q*) (parcela devida à Terra)

$$V_A = \underbrace{k_0 \cdot \frac{Q}{d_A}}_{\text{parcela devida a } Q} + \underbrace{V_T}_{\text{parcela devida à Terra}}$$

$$V_B = k_0 \cdot \frac{Q}{d_B} + V_T$$

Figura 17. *A* e *B* apresentam mesmo potencial.

Figura 18.

Como a parcela V_T está presente em todos os cálculos do potencial nos pontos situados no interior de uma casa, não existe inconveniente algum em considerar $V_T = 0$. Daí convenciona-se que o potencial da Terra é igual a zero:

$$V_T = 0$$

Assim, dizer que o potencial elétrico em *A* é de 10 V ($V_A = 10$ V) significa que o ponto *A* possui potencial elétrico 10 V acima do potencial elétrico da Terra.

Blindagem eletrostática

Considere um condutor oco *A* em equilíbrio eletrostático e, em seu interior, o corpo *C* (**fig. 19**). Como o campo elétrico no interior de qualquer condutor em equilíbrio eletrostático é nulo, decorre que *A* protege o corpo *C*, no seu interior, de qualquer ação elétrica externa. Mesmo um corpo eletrizado *B* externo (**fig. 20**) induz cargas em *A*, mas não em *C*. Desse modo, o condutor *A* constitui uma **blindagem eletrostática** para o corpo *C*.

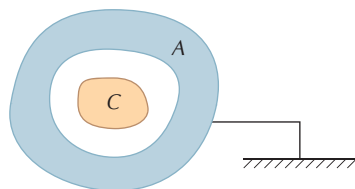



Figura 19. O condutor *A* sob potencial constante, por exemplo, ligado à Terra, protege *C* em seu interior.

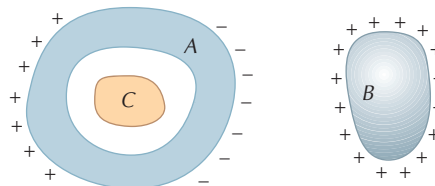



Figura 20. *B* induz cargas em *A*, mas não em *C*.

Uma tela metálica envolvendo certa região do espaço também constitui uma blindagem satisfatória.

A blindagem eletrostática é muito utilizada para a proteção de aparelhos elétricos e eletrônicos contra efeitos externos perturbadores. Os aparelhos de medidas sensíveis estão acondicionados em caixas metálicas, para que as medidas não sofram influências externas. As estruturas metálicas de um avião, de um automóvel e de um prédio constituem blindagens eletrostáticas.

A foto mostra o efeito da blindagem eletrostática: quando uma "gaiola" metálica é aproximada de um gerador de Van de Graaf eletrizado, o pêndulo preso à parte externa da "gaiola" sofre ação elétrica, enquanto o pêndulo preso à parte interna permanece em repouso.

A gaiola de Faraday

MICHAEL FARADAY (1791-1867), originário de uma família humilde, estudou sozinho e com grande dificuldade, mas se tornou, graças a seu esforço e dedicação, um notável cientista. Os estudos sobre Eletricidade devem a ele grande parte de seu desenvolvimento.

Dentre as muitas experiências e realizações de Faraday, é relevante a construção de uma gaiola metálica, por ele utilizada para demonstrar que condutores carregados eletrizam-se apenas em sua superfície externa. O próprio Faraday entrou na gaiola, grande o suficiente para abrigá-lo, e fez com que seus assistentes a eletrizassem intensamente. Da gaiola, mantida sobre suportes isolantes, chegaram a saltar faíscas, mas o cientista, em seu interior, não sofreu efeito elétrico algum. Faraday conseguiu assim comprovar sua tese, da qual se originou a utilização das **blindagens eletrostáticas**, que protegem os aparelhos sensíveis de interferências elétricas externas.

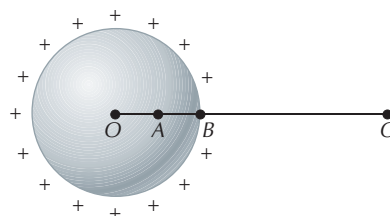
A pessoa dentro da gaiola de Faraday não sofre os efeitos da descarga elétrica. Demonstração realizada no Museu de Ciência de Boston (EUA).

Conteúdo digital Moderna PLUS http://www.modernaplus.com.br
A Física em nosso Mundo: *Eletricidade na atmosfera: raio – relâmpago – trovão*

Entre na rede No endereço eletrônico http://oglobo.globo.com/online/blogs/arquivos/2003-12-03_20h28_Raio_atinge_aviao_-_anim.gif (acesso em julho/2009), você pode ver um rápido vídeo mostrando o momento em que um avião é atingido por um raio. No interior da aeronave ninguém sofreu nada, devido ao efeito da blindagem eletrostática (gaiola de Faraday).

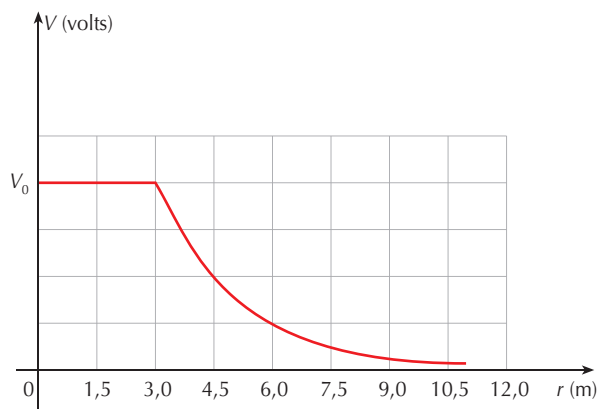
EXERCÍCIOS PROPOSTOS DE RECAPITULAÇÃO

Nos exercícios a seguir considere, quando necessário, $k_0 = 9 \cdot 10^9 \frac{N \cdot m^2}{C^2}$.

P. 83 Consideremos um condutor esférico de raio R = 0,1 m e eletrizado com carga Q = 1,0 μC no vácuo. Sabe-se que *OC* = 0,3 m.

Determine:

a) os potenciais elétricos em *O*, *A*, *B* e *C*;

b) as intensidades do campo elétrico em *O*, *A*, *B* e *C*.

P. 84 (UFPE) O gráfico representa a variação do potencial elétrico de uma distribuição esférica de carga com a distância r a seu centro. Sabendo-se que o valor de V_0 é 60 volts e que o valor em coulombs da carga total da esfera pode ser escrito como $q \cdot 10^{-9}$, determine o valor de q.

P. 85 (UFPE) Uma casca esférica metálica muito fina tem raio de 1,0 m e é carregada eletricamente com uma carga total de $0,8 \cdot 10^{-7}$ C. Determine o valor em volts do potencial elétrico a uma distância de 12 m do centro da casca esférica.

P. 86 (UFRJ) Sabe-se que quando o campo elétrico atinge o valor de $3 \cdot 10^6$ V/m o ar seco torna-se condutor e que nessas condições um corpo eletrizado perde carga elétrica. Calcule:

a) o raio da menor esfera que pode ser carregada até o potencial de 10^6 V sem risco de descarregar através do ar seco;

b) a carga Q armazenada nessa esfera.

P. 87 (UEM-PR) Uma esfera condutora de raio $R_1 = 30$ cm, eletrizada positivamente com uma carga $Q_1 = 20$ μC, é ligada a uma outra esfera de raio $R_2 = 10$ cm também condutora, mas descarregada. Qual o valor final da carga da esfera de raio R_1, em μC, depois que o equilíbrio é estabelecido?

P. 88 (Fuvest-SP) Dois condutores esféricos A e B de raios respectivos R e $2R$ estão isolados e muito distantes um do outro. As cargas das duas esferas são de mesmo sinal e a densidade superficial de carga da primeira é igual ao dobro da densidade de carga da segunda. Interligam-se as duas esferas por um fio condutor. Ocorre passagem de carga elétrica de um condutor para outro? Justifique sua resposta.

P. 89 (Unicamp-SP) Duas esferas condutoras A e B distantes possuem o mesmo raio R e estão carregadas com cargas $Q_A = -q$ e $Q_B = +2q$, respectivamente. Uma terceira esfera condutora C, de mesmo raio R, porém descarregada, é trazida desde longe e é levada a tocar primeiramente a esfera A, depois a esfera B e em seguida é levada novamente para longe.

a) Qual é a diferença de potencial entre as esferas A e B antes de a esfera C tocá-las?

b) Qual é a carga final da esfera C?

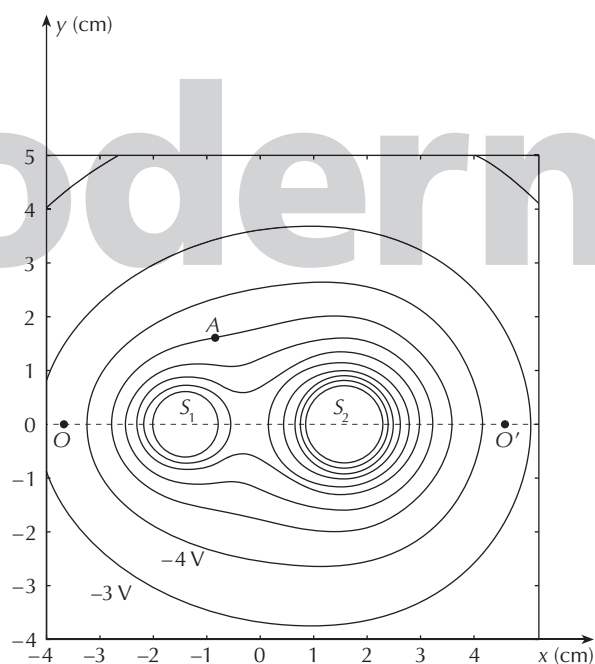
P. 90 (UFU-MG) Uma esfera condutora de raio $R = 10$ cm encontra-se isolada e carregada com uma carga $Q = -8,0 \cdot 10^{-2}$ C. Pede-se:

a) a quantidade de elétrons que a esfera deve perder para ficar neutra;

b) o módulo do campo elétrico na superfície da esfera;

c) o trabalho da força elétrica para deslocar uma carga de prova $q_0 = 1,0$ μC do infinito à superfície da esfera.

Dado: carga do elétron $= -1,6 \cdot 10^{-19}$ C

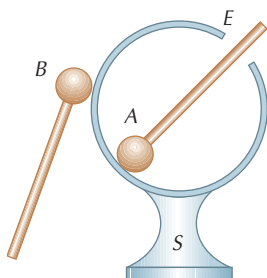
P. 91 (Fuvest-SP) Na figura estão representadas as superfícies equipotenciais do potencial eletrostático criado por duas esferas carregadas S_1 e S_2. Os centros das esferas estão sobre a reta $\overleftrightarrow{OO'}$. A diferença de potencial entre duas linhas sucessivas é de 1 volt, e as equipotenciais de -3 V e -4 V estão indicadas no gráfico.

a) Identifique os sinais das cargas elétricas Q_1 e Q_2 nas esferas S_1 e S_2. Expresse a relação entre os módulos das cargas $|Q_1|$ e $|Q_2|$, utilizando os símbolos $>$, $<$ ou $=$.

b) Na figura, represente a direção e o sentido do vetor campo elétrico $\vec{E}$ no ponto A.

c) Estime o valor do campo elétrico E no ponto A, em N/C (newton por coulomb), utilizando a escala de distâncias indicada na figura.

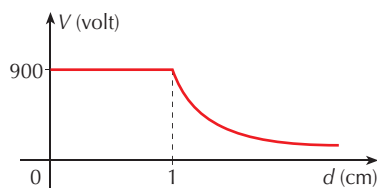
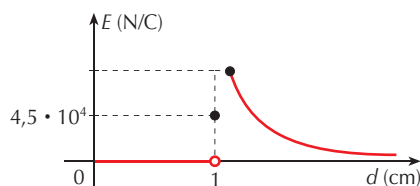
d) Se existirem um ou mais pontos em que o campo elétrico seja nulo, demarque, com a letra N, aproximadamente, a região onde isso acontece. Se em nenhum ponto o campo for nulo, responda: "Em nenhum ponto o campo é nulo".

TESTES PROPOSTOS

T. 85 (Univest-SP) Uma esfera metálica oca E, apoiada sobre um suporte isolante S, tem uma pequena cavidade e é eletrizada positivamente. Em seguida, toca-se nela com duas esferas metálicas menores A e B, inicialmente descarregadas, presas a cabos isolantes, conforme ilustrado na figura.

As cargas adquiridas por A e B são, respectivamente:

a) positiva e negativa.
b) negativa e positiva.
c) zero e negativa.
d) positiva e positiva.
e) zero e positiva.

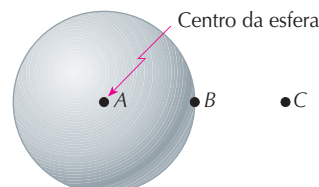
O enunciado a seguir refere-se aos testes **T.86** e **T.87**.

(UEM-PR) Os gráficos representam a variação da intensidade do campo e do potencial (em uma dimensão) devido a um condutor esférico uniformemente eletrizado no vácuo $\left(k_0 = 9 \cdot 10^9 \, \frac{N \cdot m^2}{C^2}\right)$.

T. 86 A carga elétrica distribuída na superfície da esfera vale:

a) $+10^{-7}$ C
b) -10^{-7} C
c) $+10^{-9}$ C
d) -10^{9} C
e) $+10^{7}$ C

T. 87 O ponto externo à esfera cujo campo tem a mesma intensidade do campo na superfície dista do centro aproximadamente:

a) 2,8 cm
b) 1,4 cm
c) 0,4 cm
d) 2,1 cm
e) 2,4 cm

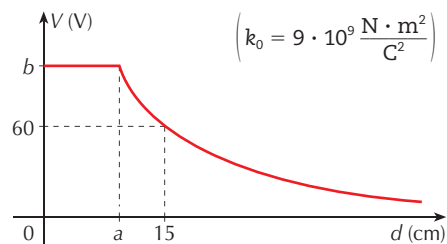
T. 88 (PUC-MG) Seja um condutor esférico carregado positivamente e V_A, V_B e V_C os potenciais nos pontos A, B e C.

Afirma-se que:

a) $V_A > V_B > V_C$
b) $V_A < V_B < V_C$
c) $V_A > V_B = V_C$
d) $V_A = V_B > V_C$
e) $V_A < V_B = V_C$

T. 89 (UEL-PR) Um condutor esférico de 20 cm de diâmetro está uniformemente eletrizado com carga de 4,0 μC e em equilíbrio eletrostático. Em relação a um referencial no infinito, o potencial elétrico de um ponto P, que está a 8,0 cm do centro do condutor, vale, em volts:

a) $3,6 \cdot 10^5$
b) $9,0 \cdot 10^4$
c) $4,5 \cdot 10^4$
d) $3,6 \cdot 10^4$
e) $4,5 \cdot 10^3$

Dado: constante eletrostática do meio $= 9,0 \cdot 10^9 \, \frac{N \cdot m^2}{C^2}$

T. 90 (Mackenzie-SP) Considerando um ponto do infinito como referencial, o potencial elétrico de uma esfera condutora no vácuo varia com a distância ao seu centro, segundo o gráfico a seguir.

A capacidade elétrica dessa esfera é 10 pF. Os valores de a e b do gráfico são, respectivamente:

a) 5 e 100
b) 6 e 100
c) 5 e 120
d) 6 e 120
e) 9 e 100

T. 91 (PUC-MG) Uma carga positiva Q está distribuída sobre uma esfera de raio R fabricada com um material condutor que pode ser inflado. A esfera é inflada até que o novo raio seja o dobro do anterior. Nessa condição final, é **correto** dizer que:

a) o potencial e a capacitância dobram de valor.
b) o potencial fica reduzido à metade e a capacitância dobra de valor.
c) o potencial e a capacitância ficam reduzidos à metade do valor inicial.
d) o potencial e a capacitância não mudam.
e) o potencial não muda e a capacitância fica reduzida à metade.

V3_P1_UN_A_CAP_04.indd 107 17.09.09 17:35:35

T. 92 (PUC-MG) Uma esfera condutora de raio R possui carga negativa de valor Q. De repente, sua carga dobra de valor. Nessa condição final, é **correto** afirmar que:

a) o potencial e a capacitância dobram de valor.

b) o potencial fica reduzido à metade e a capacitância dobra de valor.

c) o potencial e a capacitância ficam reduzidos à metade do valor inicial.

d) o potencial dobra e a capacitância não muda.

e) o potencial não muda e a capacitância fica reduzida à metade.

T. 93 (PUC-MG) Considere pontos fora e dentro de um condutor carregado e em equilíbrio eletrostático. Quando se tratar de pontos externos, considere-os bem próximos de sua superfície. Admita, ainda, um condutor de forma irregular, contendo regiões pontiagudas. O campo elétrico nos pontos considerados será:

a) constante em módulo para qualquer ponto externo.

b) constante, não nulo, para pontos internos.

c) mais forte onde o condutor apresentar pontas, para pontos externos.

d) tangente à superfície para pontos externos.

e) perpendicular à superfície para pontos internos.

T. 94 (UCSal-BA) Uma esfera metálica pequena eletrizada negativamente toca uma esfera metálica isolada, muito maior, inicialmente descarregada. Supondo a inexistência de perdas de carga para o ambiente, é **correto** afirmar que a esfera pequena:

a) não cede carga para a esfera maior.

b) cede um pouco de sua carga para a esfera muito maior.

c) cede a maior parte de sua carga para a esfera muito maior.

d) cede toda a sua carga para a esfera muito maior.

e) cede 50% de sua carga para a esfera muito maior.

T. 95 (Mackenzie-SP) Para praticar seus conhecimentos de Eletricidade, Sérgio dispõe de duas esferas metálicas A e B. A esfera B possui volume 8 vezes maior que o de A e ambas estão inicialmente neutras. Numa primeira etapa, eletriza-se a esfera A com 4,0 μC e a B com 5,0 μC. Numa segunda etapa, as esferas são colocadas em contato e atingem o equilíbrio eletrostático. Após a segunda etapa, as cargas elétricas das esferas serão, respectivamente:

a) $Q_A = 1{,}0\ \mu C$ e $Q_B = 8{,}0\ \mu C$

b) $Q_A = 8{,}0\ \mu C$ e $Q_B = 1{,}0\ \mu C$

c) $Q_A = 4{,}5\ \mu C$ e $Q_B = 4{,}5\ \mu C$

d) $Q_A = 6{,}0\ \mu C$ e $Q_B = 3{,}0\ \mu C$

e) $Q_A = 3{,}0\ \mu C$ e $Q_B = 6{,}0\ \mu C$

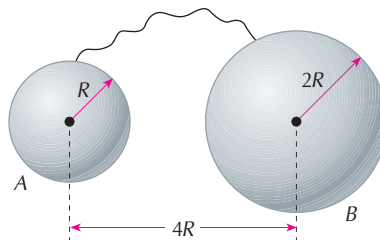
T. 96 (Ufop-MG) Considere duas esferas de cobre, de diâmetros $d_1 = 10 \times 10^{-2}$ m e $d_2 = 4 \times 10^{-2}$ m, inicialmente isoladas, muito afastadas e carregadas com carga negativa $Q_1 = -21 \times 10^{-6}$ C e com carga positiva $Q_2 = 35 \times 10^{-6}$ C, respectivamente. Ligando-se as esferas por meio de um fio de cobre muito fino, após se estabelecer o equilíbrio eletrostático, as cargas nas esferas serão, respectivamente:

a) 4×10^{-6} C e 10×10^{-6} C

b) 10×10^{-6} C e 4×10^{-6} C

c) 40×10^{-6} C e 16×10^{-6} C

d) 16×10^{-6} C e 40×10^{-6} C

T. 97 (UFBA) A figura representa duas esferas condutoras A e B, de raios R e $2R$, respectivamente, no vácuo, ligadas por um fio condutor ideal.

Antes da ligação, A encontrava-se eletricamente neutra e B possuía carga Q. Considere-se k_0 a constante eletrostática do vácuo. Após o equilíbrio eletrostático do sistema, pode-se afirmar que:

(01) a carga de B tem módulo igual a $\frac{2Q}{3}$;

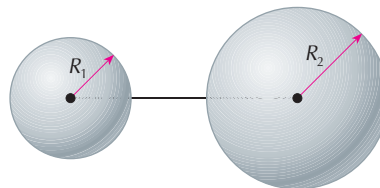
(02) na superfície de A, o potencial elétrico é igual a $\frac{k_0Q}{3R}$;

(04) na superfície de A e de B, o campo elétrico tem a mesma intensidade;

(08) o campo elétrico, no centro de A, é mais intenso do que no centro de B;

(16) a intensidade da força elétrica, entre as esferas, é igual a $\frac{k_0Q^2}{4R^2}$.

Dê como resposta a soma dos números que precedem as afirmativas corretas.

T. 98 (PUC-SP) O sistema de condutores da figura consta de duas esferas de raios $R_1 = a$ e $R_2 = 2a$, interligadas por um fio condutor de capacidade nula.

Quando o sistema é eletrizado com carga positiva Q, após o equilíbrio eletrostático ser alcançado, o condutor de raio R_1 apresenta densidade elétrica superficial σ_1 e o de raio R_2 apresenta densidade elétrica superficial σ_2. Nesta situação a relação $\frac{\sigma_1}{\sigma_2}$ vale:

a) zero

b) 0,5

c) 1,0

d) 1,5

e) 2,0

T. 99 (ITA-SP) Uma esfera condutora de raio 0,500 cm é levada a um potencial de 10,0 V. Uma segunda esfera, bem afastada da primeira, tem raio 1,00 cm e está ao potencial 15,0 V. Elas são ligadas por um fio de capacitância desprezível. Sabendo que o meio no qual a experiência é realizada é homogêneo e isotrópico, podemos afirmar que os potenciais finais das esferas serão:

a) 12,5 V e 12,5 V
b) 8,33 V para a primeira e 16,7 V para a segunda
c) 16,7 V para a primeira e 8,33 V para a segunda
d) 13,3 V e 13,3 V
e) zero para a primeira e 25,0 V para a segunda

T. 100 (UFV-MG) Durante uma tempestade, um raio atinge um ônibus que trafega por uma rodovia.

Pode-se afirmar que os passageiros:

a) não sofrerão dano físico em decorrência desse fato, pois os pneus de borracha asseguram o isolamento elétrico do ônibus.
b) serão atingindos pela descarga elétrica, em virtude da carroceria metálica ser boa condutora de eletricidade.
c) serão parcialmente atingidos, pois a descarga será homogeneamente distribuída na superfície interna do ônibus.
d) não sofrerão dano físico em decorrência desse fato, pois a carroceria metálica do ônibus atua como blindagem.
e) não serão atingidos, pois os ônibus interurbanos são obrigados a portar um para-raios em sua carroceria.

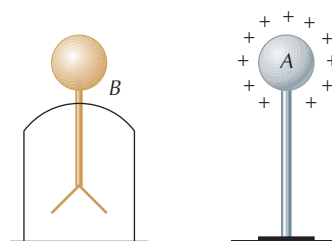
T. 101 (UFRN) Mauro ouviu no noticiário que os presos do Carandiru, em São Paulo, estavam comandando, de dentro da cadeia, o tráfico de drogas e fugas de presos de outras cadeias paulistas, por meio de telefones celulares. Ouviu também que uma solução possível para evitar os telefonemas, em virtude de ser difícil controlar a entrada de telefones no presídio, era fazer uma blindagem das ondas eletromagnéticas, usando telas de tal forma que as ligações não fossem completadas. Mauro ficou em dúvida se as telas eram metálicas ou plásticas. Resolveu, então, com seu celular e o telefone fixo de sua casa, fazer duas experiências bem simples.

1ª) Mauro lacrou um saco plástico com seu celular dentro. Pegou o telefone fixo e ligou para o celular. A ligação foi completada.

2ª) Mauro repetiu o procedimento, fechando uma lata metálica com o celular dentro. A ligação não foi completada.

O fato de a ligação não ter sido completada na segunda experiência, justifica-se porque o interior de uma lata metálica fechada:

a) permite a polarização das ondas eletromagnéticas diminuindo a sua intensidade.
b) fica isolado de qualquer campo magnético externo.
c) permite a interferência destrutiva das ondas eletromagnéticas.
d) fica isolado de qualquer campo elétrico externo.

T. 102 (PUC-SP) A presença do corpo eletrizado *A* perturba a experiência que um estudante realiza com um aparelho elétrico *B*.

Para anular esse efeito, mantendo *A* carregado, o estudante pode:

a) envolver *A* com uma esfera metálica sem ligá-la ao solo.
b) envolver *A* com uma esfera isolante sem ligá-la ao solo.
c) envolver *A* com uma esfera isolante, ligando-a ao solo.
d) envolver *A* com uma esfera metálica, ligando-a ao solo.
e) colocar entre *A* e *B* uma placa metálica.

T. 103 (UFBA) Aviões com revestimento metálico, voando em atmosfera seca, podem atingir elevado grau de eletrização, muitas vezes evidenciado por um centelhamento para a atmosfera, conhecido como fogo de santelmo. Nessas circunstâncias é correto afirmar que:

(01) a eletrização do revestimento dá-se por indução;
(02) o campo elétrico no interior do avião, causado pela eletrização do revestimento, é nulo;
(04) a eletrização poderia ser evitada revestindo-se o avião com material isolante;
(08) o centelhamento ocorre preferencialmente nas partes pontiagudas do avião;
(16) o revestimento metálico não é uma superfície equipotencial, pois, se o fosse, não haveria centelhamento;
(32) dois pontos quaisquer no interior do avião estarão a um mesmo potencial, desde que não haja outras fontes de campo elétrico.

Dê como resposta a soma dos números que precedem as afirmativas corretas.

Capítulo 5

Corrente elétrica

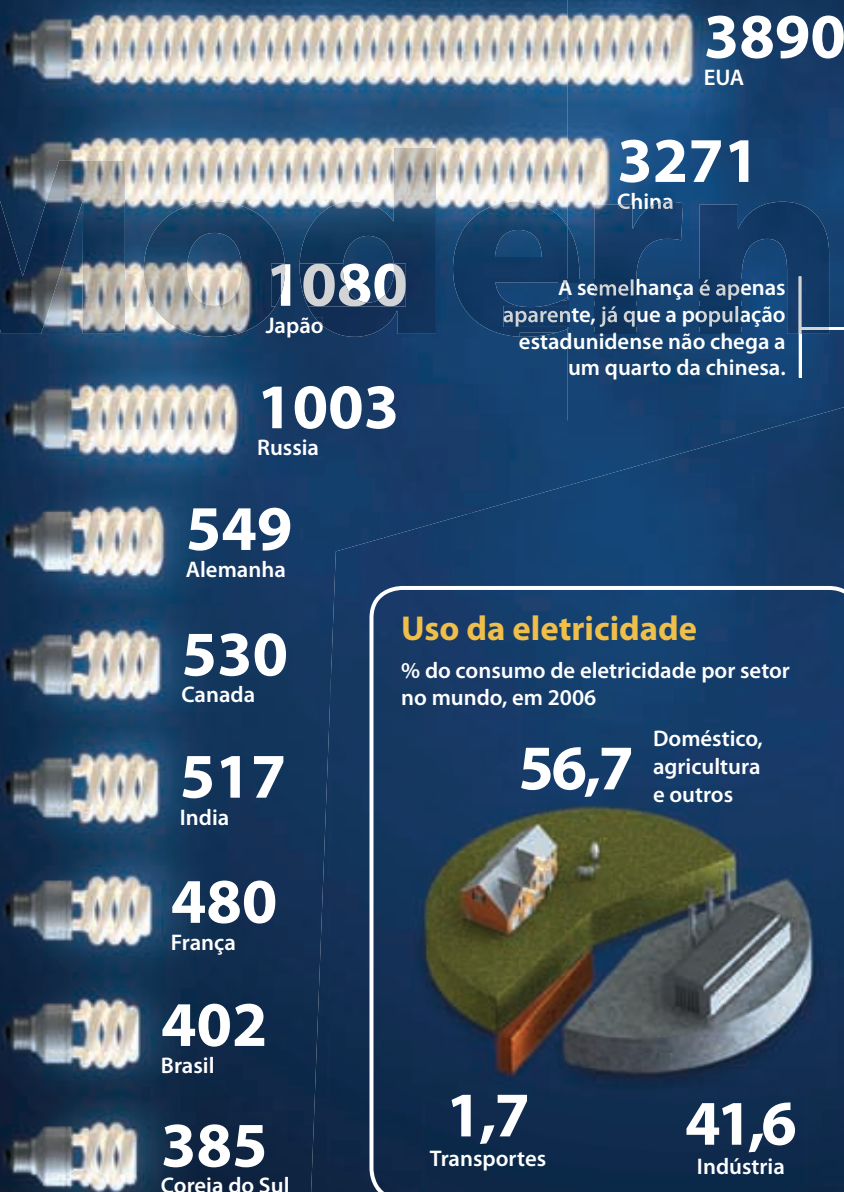
Tudo o que a Eletricidade nos proporciona baseia-se num fato muito simples: as cargas elétricas podem se mover ordenadamente.

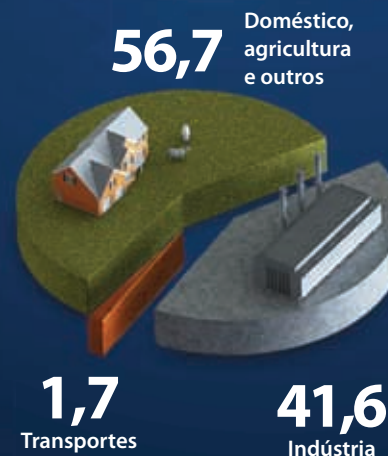
Desigualdade energética

Como outros recursos essenciais para o desenvolvimento humano, a eergia elétrica está concentrda em pouquíssimos países

Dez maiores consumidores elétricos - 2007

(consumo por país, em milhões de kWh)

O mundo inteiro consumiu **17,7 trilhões de kWh** em 2007. 40% disso foram gastos por apenas dois países: Estados Unidos e China.

Uso da eletricidade

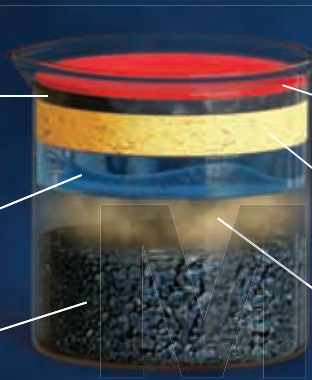
% do consumo de eletricidade por setor no mundo, em 2006

Claro-escuro

Esses globos montados com fotos noturnas feitas por satélites mostram que a desigualdade no acesso à eletricidade é visível até do espaço.

Falta de eletricidade é um dos problemas que dificultam o desenvolvimento de regiõe pobres, como a África, com 15% da população mundial mas apens 3% da eletricidade.

De onde vem

(Participação na geração elétrica mundial por fonte)

Termoelétricas movidas a combustíveis fósseis são a principal fonte mundial de eletricidade. Isso faz do setor elétrico um dos grandes emissores de gases do efeito estufa.

Para pensar

1. Qual a influência da vegetação e dos corpos d'água na temperatura ambiente?
2. Por quê as regiões densamente urbanizadas têm temperaturas maiores que outras regiões?

Energias renováveis

Aqui o uso intenso das hidrelétricas reduz a participação do país na emissão de gases do efeito estufa, amenizando a participação da América Latina nesse ranking.

Na escuridão

(Pessoas sem eletricidade, em milhões)

A ONU conta 1,6 bilhão de pessoas vivendo às escuras. 80% delas em regiões rurais.

Seção 5.1

A corrente elétrica

Objetivos

- Definir corrente elétrica.
- Conceituar intensidade de corrente elétrica.
- Conhecer a unidade de medida de intensidade de corrente elétrica no SI.
- Conhecer o sentido convencional da corrente elétrica.

Termos e conceitos

- gerador elétrico
- corrente contínua
- corrente alternada

Considere um aparelho como o da **figura 1**, cuja função é manter entre seus terminais A e B uma diferença de potencial elétrico (ddp) expressa por $V_A - V_B$. Esse aparelho é chamado **gerador elétrico** e seus terminais A e B são denominados **polos**.

O polo positivo é o de maior potencial (V_A).
O polo negativo é o de menor potencial (V_B).

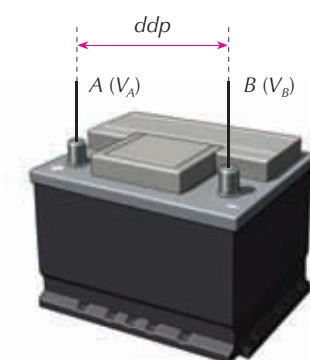



Figura 1. O gerador mantém entre os polos A e B uma ddp. A bateria utilizada em automóveis é um exemplo de gerador elétrico.

Considere, agora, um condutor metálico em equilíbrio eletrostático (**fig. 2**). Sabemos que os seus **elétrons livres** estão **em movimento desordenado**, com velocidades em todas as direções, porém sem saírem do condutor, não produzindo, portanto, efeito externo. Todos os pontos do condutor metálico em equilíbrio têm o mesmo potencial elétrico.

A

B

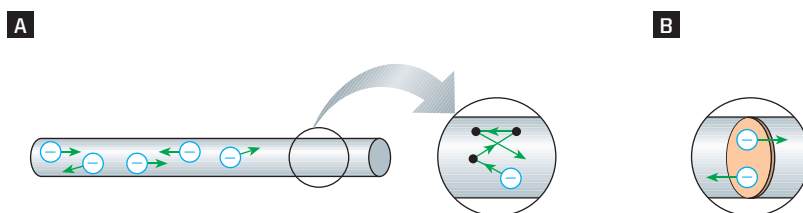



Figura 2. (A) Num condutor metálico em equilíbrio eletrostático, o movimento dos elétrons livres é desordenado. Em destaque, a representação de um elétron livre em movimento desordenado. (B) O número de elétrons livres que atravessam a secção transversal do condutor em equilíbrio eletrostático, num certo intervalo de tempo, é igual nos dois sentidos.

Ligando-se esse condutor aos polos A e B do gerador elétrico, ele ficará submetido à ddp $V_A - V_B$, que origina, no interior do condutor, o campo elétrico $\vec{E}$, orientado do polo positivo para o polo negativo. Nesse campo elétrico, cada elétron fica sujeito a uma força elétrica $\vec{F}_e = q\vec{E}$ (de sentido oposto ao do vetor $\vec{E}$, pois a carga elétrica do elétron é negativa).

Sob ação da força elétrica $\vec{F}_e$, os elétrons livres alteram suas velocidades, adquirindo, na sua maioria, movimento ordenado, cuja velocidade média tem a direção e o sentido da força $\vec{F}_e$ (**fig. 3**). **Esse movimento ordenado de cargas elétricas constitui a corrente elétrica**. É importante realçar que os elétrons livres, apesar de seu movimento ordenado, colidem continuamente com os átomos do material, seguindo trajetórias

V3_P1_UN_A_CAP_05.indd 112 17.09.09 17:40:55

irregulares e com velocidades médias muito pequenas. Eles avançam no sentido da força elétrica, superpondo-se ao movimento caótico que resulta dos choques com os átomos do condutor (**figura 3**, no destaque).

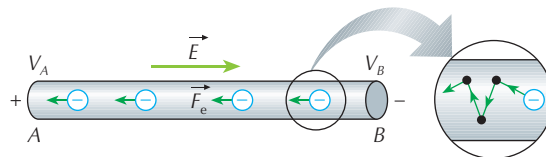



Figura 3. **Ligando o condutor ao gerador, há uma ddp $V_A - V_B$ entre os terminais do condutor e o movimento dos elétrons é ordenado. Em destaque, a representação de um elétron livre avançando sob ação do campo elétrico.**

O papel de grande importância que a Eletricidade desempenha na vida moderna baseia-se na corrente elétrica. A parte da Eletricidade que estuda a corrente elétrica e os efeitos produzidos pelo caminho por onde ela passa denomina-se **Eletrodinâmica**.

Entre na rede No endereço eletrônico http://br.geocities.com/saladefisica3/laboratorio/corrente/corrente.htm (acesso em junho/2009), você pode simular o movimento dos elétrons livres num condutor metálico, antes e após a aplicação de uma ddp entre os extremos do condutor.

1 Intensidade de corrente elétrica

Suponha um condutor metálico (**fig. 4**) ligado aos terminais de um gerador. Seja n o número de elétrons que atravessam a seção transversal desse condutor desde o instante t até o instante $t + \Delta t$. Como cada elétron apresenta, em módulo, a carga elementar e, no intervalo de tempo Δt passa por essa secção transversal uma carga elétrica cujo valor absoluto é dado por:

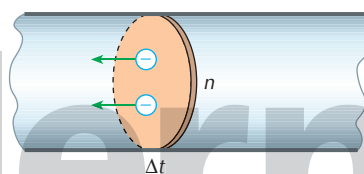



Figura 4. **No intervalo de tempo Δt, n elétrons passam pela seção do condutor.**

$$\Delta q = ne$$

Define-se **intensidade média de corrente elétrica**, no intervalo de tempo t a $t + \Delta t$, como o quociente:

$$i_m = \frac{\Delta q}{\Delta t}$$

Quando a corrente varia com o tempo, define-se **intensidade de corrente em um instante *t*** como sendo o limite para o qual tende a intensidade média, quando o intervalo de tempo Δt tende a zero:

$$i = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta q}{\Delta t}$$

Denominamos **corrente contínua constante** toda corrente de sentido e intensidade constantes com o tempo. Nesse caso, a intensidade média da corrente elétrica i_m em qualquer intervalo de tempo Δt é a mesma e, portanto, igual à intensidade i em qualquer instante t.

$$i_m = i$$

A **figura 5** mostra o gráfico dessa corrente em função do tempo. Esse é o caso mais simples de corrente elétrica, com o qual iniciaremos o estudo de Eletrodinâmica.

A pilha mostrada ao lado do gráfico da **figura 5** fornece corrente contínua.

Além da corrente contínua constante, é importante estudar a **corrente alternada***, que muda periodicamente de intensidade e de sentido (**fig. 6**). Os terminais das tomadas das residências fornecem uma corrente alternada de frequência 60 Hz (Hz = hertz = ciclos/segundo).

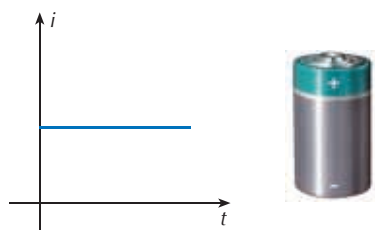



Figura 5. A corrente contínua constante tem sentido e intensidade constantes com o tempo.

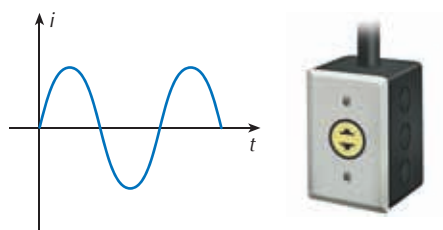



Figura 6. A corrente alternada muda periodicamente no tempo. No caso da figura, a corrente alternada é senoidal.

Unidade de intensidade de corrente elétrica

A unidade de intensidade de corrente é a **unidade fundamental elétrica do Sistema Internacional de Unidades (SI)** e denominada **ampère** (símbolo **A**), em homenagem ao cientista francês André-Marie Ampère**. Essa unidade é definida por meio de um fenômeno eletromagnético, como veremos no capítulo 14.

Os principais submúltiplos do ampère são o **miliampère** (símbolo **mA**) e o **microampère** (símbolo **μA**).

$$1 \text{ mA} = 10^{-3} \text{ A} \quad \text{e} \quad 1 \mu\text{A} = 10^{-6} \text{ A}$$

Observação

A unidade de carga elétrica no SI, o coulomb (C), é definida a partir do ampère (A), por meio da fórmula $\Delta q = i \cdot \Delta t$. Realmente, fazendo $i = 1$ A e $\Delta t = 1$ s, teremos $\Delta q = 1$ C. Assim, podemos escrever que 1 C = 1 A · 1 s (1 coulomb = 1 ampère vezes 1 segundo).

Portanto:

1 C é a carga elétrica que atravessa, durante 1 s, a seção transversal de um condutor pelo qual flui uma corrente elétrica de intensidade 1 A.

2 Sentido convencional da corrente elétrica

O sentido do movimento dos elétrons é oposto ao sentido do campo elétrico no interior do condutor metálico, pois: $\vec{F}_e = q\vec{E}$ e q é negativo.

Contudo, por convenção:

O sentido da corrente elétrica é igual ao sentido do campo elétrico no interior do condutor.

* Noções de corrente alternada serão apresentadas no capítulo 16.

** **AMPÈRE**, André-Marie (1775-1836), matemático e físico francês, lecionou Análise Matemática na Escola Politécnica de Paris. Com 45 anos interessou-se pela Eletricidade e, graças ao seu invejável senso matemático, conseguiu generalizar resultados experimentais particulares. Em 1826, elaborou a célebre "Teoria Matemática dos Fenômenos Eletrodinâmicos deduzidos unicamente da experiência".

Essa convenção é internacionalmente adotada, e a corrente considerada nessas condições é chamada **corrente convencional** (fig. 7A).

A corrente convencional pode então ser **imaginada como se fosse constituída de cargas livres positivas em movimento** (fig. 7B); assim, sempre que falarmos em **sentido da corrente**, estaremos nos referindo ao sentido do movimento dessas cargas. Portanto, ao mencionarmos **corrente em um condutor**, estaremos nos referindo à corrente convencional. Observe que a corrente convencional tem sentido contrário ao sentido real de movimento dos elétrons. **No sentido convencional, a corrente elétrica entra no gerador pelo polo negativo e sai pelo polo positivo**.

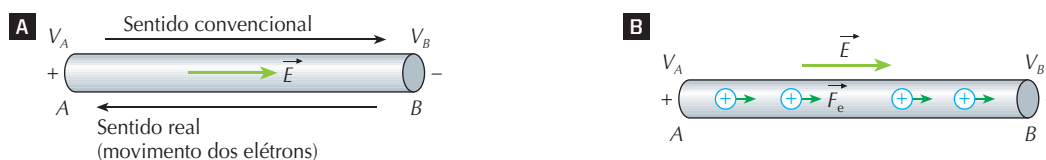



Figura 7. (A) O sentido convencional da corrente elétrica é o sentido do campo elétrico. (B) O sentido convencional é o sentido que teríamos se as cargas elétricas livres fossem positivas.

Seção 5.2

Circuito elétrico

Objetivos

- Compreender o que é um circuito elétrico.
- Analisar um exemplo de circuito elétrico destacando seus elementos.
- Descrever como se procede para medir a intensidade de corrente elétrica que percorre os diversos elementos de um circuito elétrico.

Termos e conceitos

- amperímetro
- regra dos nós

Denominamos **circuito elétrico** ao conjunto de aparelhos com os quais se pode estabelecer uma corrente elétrica, como o das fotos abaixo. O gerador é a parte interna do circuito; os demais aparelhos constituem o circuito externo.

Fechar um circuito é efetuar a ligação que permite a passagem da corrente elétrica; **abrir** um circuito é interromper essa corrente. Tais operações se efetuam, geralmente, por meio de uma **chave** (fig. 8).

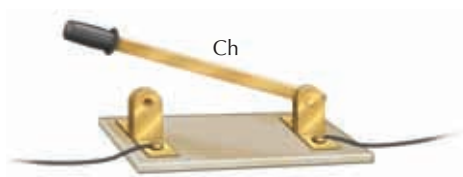



Figura 8. Chave Ch, para fechar ou abrir um circuito elétrico.

A bateria e a lâmpada, ligadas por fios condutores, constituem um circuito elétrico. Ao fechar a chave (interruptor), há passagem de corrente elétrica e a lâmpada acende.

Medida da intensidade de corrente elétrica

Para medir a intensidade de uma corrente elétrica são construídos aparelhos geralmente denominados **amperímetros** (**fig. 9**). Esses aparelhos possuem dois terminais acessíveis e devem ser colocados no circuito de modo que a corrente a ser medida possa atravessar o medidor.

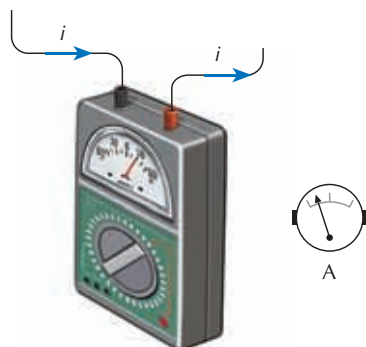



Figura 9. Aparelho destinado a medir a intensidade de corrente. Ao lado dele temos um dos símbolos usados para representar um amperímetro no circuito.

No circuito elétrico da **figura 10A** existe apenas um caminho para a corrente que se quer medir. Verificamos que os amperímetros A_1, A_2 e A_3, colocados em diversos pontos do circuito, fornecem a mesma indicação *i*. Para circuitos que oferecem apenas um caminho para a corrente, **a intensidade de corrente é a mesma em todos os pontos**.

No circuito da **figura 10B**, entre os pontos N' e N'', temos dois trechos de circuito denominados **ramos** do circuito principal. Os pontos N' e N'', nos quais a corrente se divide, são chamados **nós** do circuito. Os amperímetros A_1 e A_2 estão colocados nos ramos e o amperímetro A_3, no circuito principal. Com a chave Ch fechada, as intensidades são, respectivamente, i_1, i_2 e i. As indicações dos amperímetros mostram que:

$$i_1 + i_2 = i$$

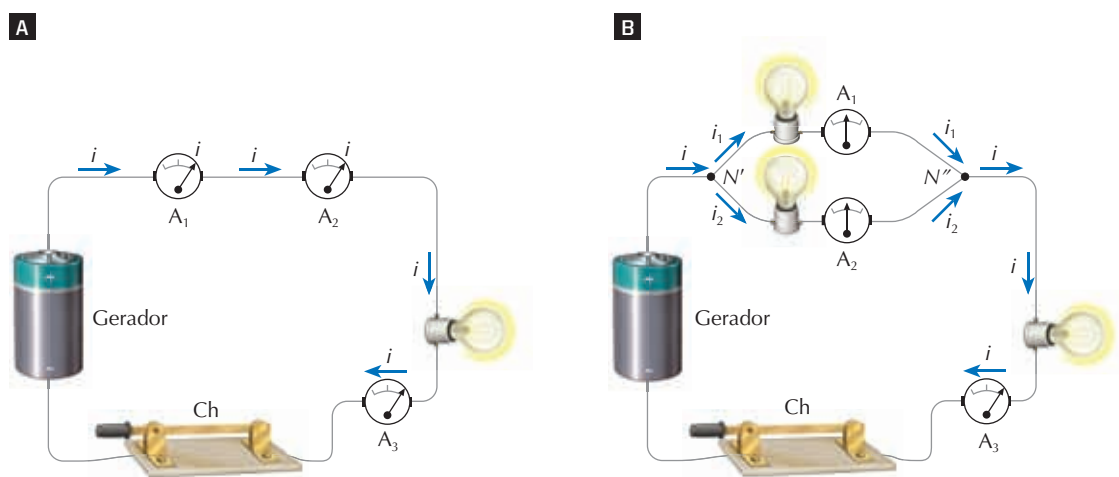



Figura 10. Medida da corrente com amperímetros. (A) Circuito que oferece apenas um caminho para a corrente. (B) Circuito onde a corrente se ramifica.

Considerando o nó N'', podemos enunciar a seguinte regra, conhecida como **regra dos nós**, que é válida para qualquer nó de um circuito:

> Em um nó, a soma das intensidades de corrente que chegam é igual à soma das intensidades de corrente que saem.

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

R. 38 Um fio metálico é percorrido por uma corrente elétrica contínua e constante. Sabe-se que uma carga elétrica de 32 C atravessa uma seção transversal do fio em 4,0 s. Sendo $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C a carga elétrica elementar, determine:

a) a intensidade de corrente elétrica;

b) o número de elétrons que atravessa uma seção do condutor no referido intervalo de tempo.

Solução:

a) Sendo $\Delta q = 32$ C e $\Delta t = 4{,}0$ s, vem: $i = \frac{\Delta q}{\Delta t} \Rightarrow i = \frac{32}{4{,}0} \Rightarrow \boxed{i = 8{,}0 \text{ A}}$

b) Sendo n o número de elétrons e e a carga elétrica elementar, temos:

$$\Delta q = ne \Rightarrow n = \frac{\Delta q}{e} \Rightarrow n = \frac{32}{1{,}6 \cdot 10^{-19}} \Rightarrow \boxed{n = 2{,}0 \cdot 10^{20} \text{ elétrons}}$$

Resposta: a) 8,0 A; b) $2{,}0 \cdot 10^{20}$ elétrons

R. 39 É possível medir a passagem de $5{,}0 \cdot 10^2$ elétrons por segundo através de uma seção de um condutor com certo aparelho sensível. Sendo a carga elementar $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C, calcule a intensidade de corrente correspondente ao movimento.

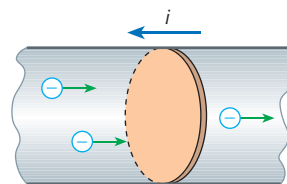
Solução:

Em $\Delta t = 1$ s, passam pela seção indicada em laranja na figura $n = 5{,}0 \cdot 10^2$ elétrons, cada qual dotado de carga $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C.

Assim: $i = \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{ne}{\Delta t} = \frac{5{,}0 \cdot 10^2 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}}{1} \Rightarrow i = 800 \cdot 10^{-19} \text{ A} \Rightarrow \boxed{i = 8{,}0 \cdot 10^{-17} \text{ A}}$

Resposta: $8{,}0 \cdot 10^{-17}$ A

Observação:

No esquema da solução, observe o sentido da corrente convencional, que é contrário ao do movimento dos elétrons.

R. 40 Um fio de cobre, de área de seção transversal $5{,}0 \cdot 10^{-3}$ cm², é percorrido por uma corrente contínua de intensidade 1,0 A. Adotando a carga elementar $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C, determine:

a) o número de elétrons passando por uma seção transversal do condutor em 1,0 s;

b) a velocidade média dos elétrons, sabendo que existem $1{,}7 \cdot 10^{22}$ elétrons livres/cm³.

Solução:

a) Em $\Delta t = 1{,}0$ s passam n elétrons com carga de módulo $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C pela seção S destacada.

Sendo $i = \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{ne}{\Delta t}$, tem-se que: $n = \frac{i \cdot \Delta t}{e} \Rightarrow$

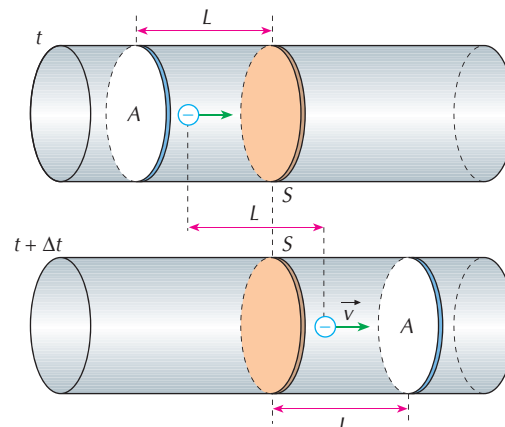
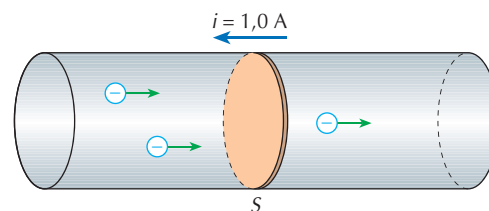
$$\Rightarrow n = \frac{i \cdot \Delta t}{e} \Rightarrow n = \frac{1{,}0 \cdot 1{,}0}{1{,}6 \cdot 10^{-19}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \boxed{n = 6{,}25 \cdot 10^{18} \text{ elétrons}}$$

b) No instante t, os elétrons livres existentes no volume $A \cdot L$ antes da seção S destacada põem-se em movimento simultaneamente. No intervalo de tempo Δt, atravessam a seção S e ocupam o mesmo volume $A \cdot L$ após a seção S no instante $t + \Delta t$.

Cada elétron livre percorre a distância L no intervalo de tempo Δt e, portanto, a velocidade média de cada elétron no volume será: $v = \frac{L}{\Delta t}$ ①

Sendo n o número de elétrons que atravessa S em Δt e N o número de elétrons por cm³, temos $n = N \cdot A \cdot L$.

Como $i = \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{ne}{\Delta t}$, segue: $i = \frac{N \cdot A \cdot L \cdot e}{\Delta t}$ ②

Substituindo-se ① na expressão ②, vem:

$$i = N \cdot A \cdot v \cdot e \Rightarrow \boxed{v = \frac{i}{N \cdot A \cdot e}}$$

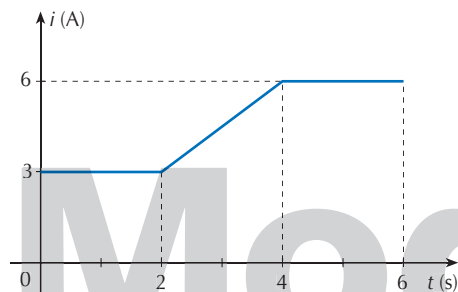
sendo que, com as unidades do exercício, v sairá em cm/s.
Substituindo os valores:

$$v = \frac{1{,}0}{1{,}7 \cdot 10^{22} \cdot 5{,}0 \cdot 10^{-3} \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}} \Rightarrow v = 0{,}074 \text{ cm/s} \Rightarrow \boxed{v = 0{,}74 \text{ mm/s}}$$

Resposta: a) $6{,}25 \cdot 10^{18}$ elétrons; b) 0,74 mm/s

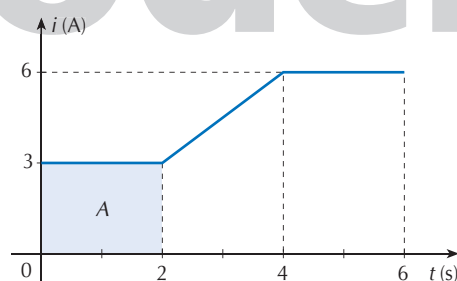
Observação:
O resultado $v = 0{,}74$ mm/s pode suscitar a seguinte questão: "Ao ligar a chave de um aparelho elétrico, ele começa a funcionar quase instantaneamente, embora possa estar a centenas de metros de distância. Como isso é possível, se a velocidade dos elétrons nos condutores é relativamente baixa?". A explicação é simples: os elétrons livres do condutor se põem em movimento simultaneamente em todo o circuito.

R. 41 O gráfico representa a intensidade de corrente que percorre um condutor em função do tempo. Determine a carga elétrica que atravessa uma seção transversal do condutor entre os instantes:

a) 0 e 2 s
b) 2 e 4 s

Solução:

a) No intervalo de tempo de 0 a 2 s, a intensidade de corrente é constante e portanto coincide com a intensidade média. Desse modo, como $i = 3$ A e $\Delta t = 2$ s, temos:

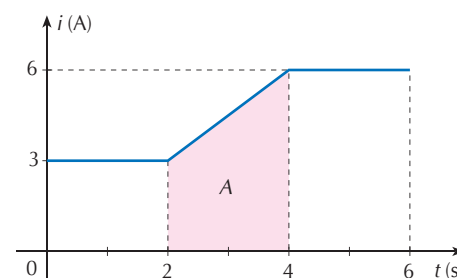
$$i = \frac{\Delta q}{\Delta t} \Rightarrow \Delta q = i \cdot \Delta t \Rightarrow \Delta q = 3 \cdot 2 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \boxed{\Delta q = 6 \text{ C}}$$

Observe que a carga elétrica $\Delta q = i \cdot \Delta t$ é numericamente igual à área do retângulo destacado no gráfico i em função de t:

$$A = 2 \cdot 3 = 6 \Rightarrow \boxed{\Delta q = 6 \text{ C}}$$

Observação:
Essa propriedade vale, também, quando a intensidade de corrente é variável. Isto é, **no gráfico da intensidade de corrente instantânea em função do tempo, a área, num certo intervalo de tempo, é numericamente igual à carga elétrica que atravessa a seção transversal do condutor, nesse intervalo de tempo**.

b) Nesse caso, não podemos usar a fórmula $\Delta q = i \cdot \Delta t$, pois i não é constante. Devemos determinar, a partir do cálculo da área do trapézio destacado no gráfico, o valor da carga elétrica.

$$A = \frac{(6 + 3)}{2} \cdot 2 = 9 \Rightarrow \boxed{\Delta q = 6 \text{ C}}$$

Resposta: a) 6 C; b) 9 C

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

P. 92 Através de uma seção transversal de um condutor, passam, da direita para a esquerda, $1,0 \cdot 10^{20}$ elétrons em 10 s.
Sendo a carga elementar $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C, determine a intensidade de corrente que corresponde a esse movimento e indique seu sentido convencional.

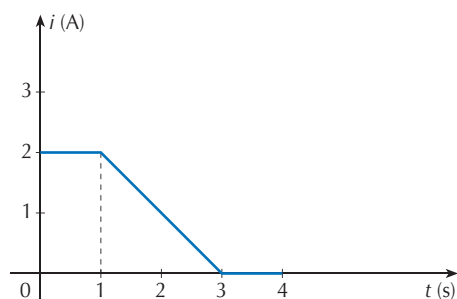
P. 93 Um condutor é percorrido por uma corrente de intensidade 20 A. Calcule o número de elétrons por segundo que passam por uma seção transversal do condutor ($e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C).

P. 94 Um fio de cobre, de área de seção transversal $8,0 \cdot 10^{-3}$ cm^2, é percorrido por uma corrente elétrica de 2,0 A. Determine a velocidade média dos elétrons que constituem a corrente elétrica, sabendo que existem $8,4 \cdot 10^{22}$ elétrons livres/cm^3.
(A carga elétrica elementar vale: $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C.)

P. 95 Uma corrente elétrica de intensidade 10 A é mantida em um condutor metálico durante 4 min. Determine, para esse intervalo de tempo:

a) a carga elétrica que atravessa uma seção do condutor;
b) o número de elétrons que atravessam a referida seção.

(A carga elétrica de um elétron tem valor absoluto de $1,6 \cdot 10^{-19}$ C.)

P. 96 O gráfico representa a intensidade de corrente que percorre um condutor em função do tempo. Determine a carga elétrica que atravessa uma seção transversal entre os instantes t = 1 s e t = 3 s.

Seção 5.3

Efeitos da corrente elétrica

Objetivos

- Conhecer os principais efeitos da corrente elétrica.
- Analisar os valores da intensidade de corrente responsáveis pelos efeitos fisiológicos.
- Conhecer as aplicações práticas dos efeitos térmico, químico e magnético.

Termos e conceitos

- choque elétrico
- efeito Joule
- efeito químico
- efeito magnético
- bússola

A passagem da corrente elétrica através dos condutores acarreta diferentes efeitos, dependendo da natureza do condutor e da intensidade de corrente. É comum dizer que a corrente elétrica tem quatro efeitos principais: **fisiológico**, **térmico** (ou **Joule**), **químico** e **magnético**.

O **efeito fisiológico** corresponde à passagem da corrente elétrica por organismos vivos. A corrente elétrica age diretamente no sistema nervoso, provocando contrações musculares; quando isso ocorre, dizemos que houve um **choque elétrico** (fig. 11).

O pior caso de choque é aquele que se origina quando uma corrente elétrica entra pela mão de uma pessoa e sai pela outra. Nesse caso, atravessando o tórax de ponta a ponta, há grande chance de a corrente afetar o coração e a respiração.

O valor mínimo de intensidade de corrente que se pode perceber é 1 mA. Esse valor provoca sensação de cócegas ou formigamento leve. Entretanto, com uma corrente de intensidade 10 mA, a pessoa já perde o controle dos músculos, sendo difícil abrir a mão e livrar-se do contato.

Figura 11. Efeito fisiológico.

O valor mortal está compreendido entre 10 mA e 3 A, aproximadamente. Nessa faixa de valores, a corrente, atravessando o tórax, atinge o coração com intensidade suficiente para modificar seu ritmo. Modificado o ritmo, o coração para de bombear sangue para o corpo e a morte pode ocorrer em segundos. Se a intensidade for ainda mais alta, a corrente pode paralisar completamente o coração. Este se contrai ao máximo e mantém-se assim enquanto passa a corrente. Interrompida a corrente, geralmente o coração relaxa e pode começar a bater novamente, como se nada tivesse acontecido. Todavia, paralisado o coração, paralisa-se também a circulação sanguínea, e uma interrupção de poucos minutos dessa circulação pode provocar danos cerebrais irreversíveis.

O **efeito térmico**, também conhecido como **efeito Joule**, é causado pelo choque dos elétrons livres contra os átomos dos condutores. Ao receberem energia, os átomos vibram mais intensamente. Quanto maior for a vibração dos átomos, maior será a temperatura do condutor. Nessas condições observa-se, externamente, o aquecimento do condutor. Esse efeito é aproveitado com frequência em aquecedores, como o chuveiro da foto. (O revestimento da parte inferior foi retirado para deixar exposto o condutor enrolado em hélice, que é atravessado pela corrente.)

Num chuveiro, a passagem da corrente elétrica pela "resistência" provoca o efeito térmico ou efeito Joule, que aquece a água.

O **efeito químico** corresponde a determinadas reações químicas que ocorrem quando a corrente elétrica atravessa soluções eletrolíticas. É muito aplicado, por exemplo, no recobrimento de metais (niquelação, cromação, prateação etc.), ilustrado na **figura 12**.

O **efeito magnético** é aquele que se manifesta pela criação de um **campo magnético** na região em torno da corrente. A existência de um campo magnético em determinada região pode ser constatada com o uso de uma **bússola**: ocorrerá desvio de direção da agulha magnética (ímã, como mostrado na **figura 13**). Esse é um efeito muito importante da corrente elétrica e é abordado detalhadamente na parte 3 (Eletromagnetismo) deste livro.

Figura 12. Efeito químico.

Figura 13. Efeito magnético.

Entre na rede No endereço eletrônico http://www.eletropaulo.com.br (acesso em junho/2009), você encontra informações de como usar a energia elétrica de forma adequada (procure em Sua segurança; Evite acidentes).

Seção 5.4

Energia e potência da corrente elétrica

Objetivos

- Relacionar o trabalho das forças elétricas com a variação da energia potencial elétrica num aparelho inserido num circuito elétrico.
- Analisar os casos em que o aparelho elétrico consome energia e os casos em que ele fornece energia.
- Caracterizar potência elétrica e energia elétrica consumida e fornecida.
- Conhecer as unidades de medida de potência e de energia elétrica.

Termos e conceitos

- trabalho motor
- trabalho resistente
- potência elétrica consumida
- potência elétrica fornecida

Um aparelho elétrico é colocado entre dois pontos, A e B, de um trecho do circuito pelo qual passa a corrente convencional de intensidade i (**fig. 14**). Sejam V_A e V_B os respectivos potenciais elétricos desses pontos e chamemos de $U = V_A - V_B$ a ddp entre os pontos. O movimento das cargas elétricas só será possível se for mantida a ddp U entre A e B.

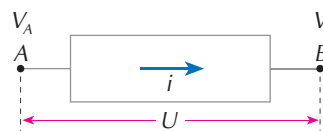



Figura 14. A ddp U deve ser mantida para que haja passagem da corrente i.

Chamemos Δq a **carga elétrica positiva** que, no intervalo de tempo Δt, atravessa esse trecho. No ponto A, a carga tem energia potencial elétrica $E_{p(A)} = \Delta q \cdot V_A$; ao chegar em B, ela tem energia potencial elétrica $E_{p(B)} = \Delta q \cdot V_B$. Quando a carga elétrica atravessa o trecho AB, o trabalho das forças elétricas é dado por:

$$\mathcal{T}_{AB} = \Delta q \cdot U = \Delta q \cdot (V_A - V_B) = \Delta q \cdot V_A - \Delta q \cdot V_B$$

Como $E_{p(A)} = \Delta q \cdot V_A$ e $E_{p(B)} = \Delta q \cdot V_B$, obtemos:

$$\mathcal{T}_{AB} = E_{p(A)} - E_{p(B)}$$

Devemos distinguir dois casos.

1º caso: $E_{p(A)} > E_{p(B)}$

Nesse caso, $V_A > V_B$. A energia elétrica da corrente diminui: **o movimento das cargas é espontâneo e o trabalho, motor**. Essa energia elétrica consumida pelo trecho AB pode ter sido transformada em energia térmica, energia mecânica, energia química etc.

A **potência elétrica consumida** é dada por: $Pot = \dfrac{\mathcal{T}_{AB}}{\Delta t}$. Mas, sendo $\mathcal{T}_{AB} = \Delta q \cdot U$, vem:

$$Pot = \frac{\Delta q \cdot U}{\Delta t}$$

Considerando que $\dfrac{\Delta q}{\Delta t} = i$, obtemos:

$$Pot = U \cdot i$$

Para chegarmos a essa fórmula, não foi necessário estabelecer nenhuma hipótese sobre a natureza das transformações que a energia elétrica sofre no trecho AB. Portanto, a fórmula é geral, podendo ser utilizada qualquer que seja o aparelho existente entre A e B.

A energia elétrica $E_{el.}$ consumida pelo aparelho existente entre A e B, num intervalo de tempo Δt, é dada pelo trabalho das forças elétricas:

$$\mathcal{T}_{AB} = Pot \cdot \Delta t \Rightarrow \boxed{E_{el.} = Pot \cdot \Delta t}$$

2º caso: $E_{p(A)} < E_{p(B)}$

Nesse caso, $V_A < V_B$. A energia elétrica da corrente aumenta: **o movimento das cargas é forçado e o trabalho, resistente**. Essa energia elétrica é fornecida pelo trecho de circuito AB à custa de outra forma de energia. É o caso do **gerador elétrico**.

A energia elétrica $E_{el.}$ é, portanto, fornecida pelo gerador, a partir de um outro tipo de energia. Nas pilhas comuns, é a energia química que se converte na energia elétrica fornecida ao circuito.

A fórmula $Pot = U \cdot i$ representa, nessas condições, a **potência elétrica fornecida pelo gerador**. U é a ddp no gerador e i, a intensidade de corrente que o atravessa.

Unidades de energia e potência elétrica

Recordemos as unidades: Pot em **watt (W)**, U em **volt (V)** e i em **ampère (A)**.

Os aparelhos elétricos trazem gravados a potência elétrica que eles consomem, bem como o valor da ddp a que devem ser ligados. Assim, um aparelho que traz a inscrição (60 W — 120 V) consome a potência elétrica de 60 W, quando ligado entre dois pontos que apresentam uma ddp de 120 V.

Em Eletricidade mede-se também a potência em quilowatt (1 kW = 10^3 W) e a energia elétrica em quilowatt-hora (kWh). A quantidade de energia trocada no intervalo de tempo de 1 h com potência de 1 kW é 1 kWh. Portanto:

$$1 \text{ kWh} = 1 \text{ kW} \cdot 1 \text{ h} = 1.000 \text{ W} \cdot 3.600 \text{ s} \Rightarrow \boxed{1 \text{ kWh} = 3{,}6 \cdot 10^6 \text{ J}}$$

Resumindo, temos:

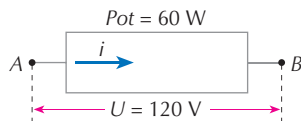
$Pot = U \cdot i$
1 W = 1 V · 1 A

e

$E_{el.} = Pot \cdot \Delta t$
1 J = 1 W · 1 s
1 kWh = 1 kW · 1 h

Procure identificar a ddp em que a lâmpada deve ser ligada e a potência que consome nas condições de funcionamento normal. O secador de cabelos da foto consome a potência de 1.400 W quando ligado a uma tensão de 127 V. Qual a intensidade de corrente que o atravessa nessas condições?

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

R. 42 Um aparelho elétrico alimentado sob ddp de 120 V consome uma potência de 60 W. Calcule:
a) a intensidade de corrente que percorre o aparelho;
b) a energia elétrica que ele consome em 8 h, expressa em kWh.

Solução:
a) A potência elétrica é dada por:

$$Pot = U \cdot i \Rightarrow 60 = 120 \cdot i \Rightarrow \boxed{i = 0{,}5\ A}$$

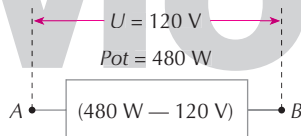
b) Sendo $Pot = 60\ W = 60 \cdot 10^{-3}$ kW e $\Delta t = 8$ h, a energia elétrica, dada pelo trabalho das forças elétricas entre A e B, será:

$$E_{el.} = Pot \cdot \Delta t = 60 \cdot 10^{-3} \cdot 8 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow E_{el.} = 480 \cdot 10^{-3}\ kWh \Rightarrow \boxed{E_{el.} = 0{,}48\ kWh}$$

Resposta: a) 0,5 A; b) 0,48 kWh

R. 43 Em um aparelho elétrico ligado corretamente lê-se a inscrição (480 W — 120 V). Sendo a carga elementar $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C, calcule o número de elétrons que passarão por uma seção transversal do aparelho em 1 s.

Solução:
A inscrição do aparelho nos fornece $Pot = 480$ W e $U = 120$ V.

Como $Pot = U \cdot i$, temos: $480 = 120i \Rightarrow i = 4$ A

Sendo $i = \frac{\Delta q}{\Delta t}$, vem:

$$i = \frac{ne}{\Delta t} \Rightarrow n = \frac{i \cdot \Delta t}{e} \Rightarrow n = \frac{4 \cdot 1}{1{,}6 \cdot 10^{-19}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \boxed{n = 2{,}5 \cdot 10^{19}\ \text{elétrons}}$$

Resposta: $2{,}5 \cdot 10^{19}$ elétrons

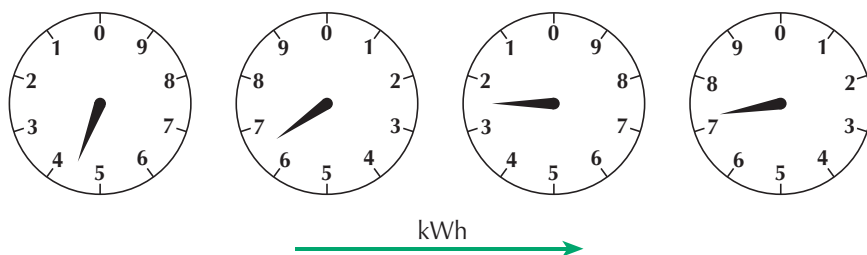
EXERCÍCIOS PROPOSTOS

P. 97 Em um chuveiro elétrico, a ddp em seus terminais vale 220 V e a corrente que o atravessa tem intensidade 10 A. Qual a potência elétrica consumida pelo chuveiro?

P. 98 Em um aparelho elétrico lê-se: 600 W — 120 V. Estando o aparelho ligado corretamente, calcule:
a) a intensidade de corrente que o atravessa;
b) a energia elétrica (em kWh) consumida em 5 h.

O relógio da luz

O que comumente chamamos de **relógio da luz** é na verdade um medidor da energia elétrica consumida no local onde é instalado. Na foto, é mostrado um desses medidores. Procure o "relógio da luz" de sua casa e compare-o com o da foto. Um disco horizontal gira quando há consumo de energia elétrica; quanto maior o consumo de energia, mais rapidamente gira o disco. Ao girar, esse disco aciona, por um sistema de engrenagens, os "reloginhos" situados na parte superior do medidor.

Ao fazer a leitura, leem-se os reloginhos da esquerda para a direita. A leitura corresponde sempre ao último número ultrapassado pelo ponteiro no seu sentido de rotação. Observe que o 1º e o 3º relógios giram no sentido anti-horário, enquanto o 2º e o 4º giram no sentido horário. Por exemplo, suponhamos que, num dado instante, os reloginhos apresentem o seguinte aspecto:

A leitura seria então: 4.627 kWh

Essa leitura em si não tem maior significado. O que interessa é a **diferença** entre duas leituras consecutivas, a qual indica o consumo. Geralmente as leituras são feitas no intervalo de um mês; desse modo, a diferença entre as leituras indicará consumo mensal naquela instalação. Por exemplo, se a leitura acima foi feita no dia 2 de outubro, e a leitura efetuada um mês depois, em 2 de novembro, foi de 5.273 kWh, o consumo no período corresponde à diferença:

$$\text{consumo} = 5.273 - 4.627 \Rightarrow \text{consumo} = 646 \text{ kWh}$$

A conta de luz

A conta de energia elétrica, usualmente chamada "conta de luz", é um demonstrativo da energia elétrica fornecida à instalação num certo período de tempo, geralmente um mês. O consumo, medido pela diferença de leituras discutida anteriormente, é expresso em quilowatts-hora (kWh).

Observe o preço do kWh e os impostos que incidem sobre a conta: o ICMS (Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços), o COSIP (Contribuição para o Custeio do Serviço de Iluminação Pública), o PIS/PASEP (Programa de Integração Social/Programa de Formação do Patrimônio do Servidor Público) e o COFINS (Contribuição Social para o Financiamento da Seguridade Social). Em "Histórico de Consumo" é possível analisar o consumo de energia elétrica nos diversos meses que antecedem o mês a que a conta se refere.

Conta de Energia Elétrica

FABIO
05001-100 SAO PAULO

Vencimento	Unidade de Leitura	Sequência	Medidor
24 JUL 2009	84001001	0112	459324

Fatura nº	Data de Emissão	Conta Referente a	Nº Instalação
003400890042	15 JUL 2009	JUL 2009	000006630

Prezado(a) FABIO,
De acordo com a resolução homologatória 846/09, a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) autorizou o reajuste médio de 12,96% nas tarifas de clientes de baixa tensão. O reajuste entra em vigor em 4 de julho de 2009.

AES Eletropaulo.

Av. Faria Lima 1644
São Paulo

Dados de Faturamento

ITENS DE FORNECIMENTO	VALOR R$
CONSUMO TARIFA R$/kWh 132,0 kWh X 0.27323000	36,07
PIS/PASEP	0,39
COFINS	1,81
ICMS	5,22

ITENS FINANCEIROS DESCRIÇÃO	VALOR R$
COSIP LEI 13.479/02	3,80

Endereço da Unidade Consumidora

CEP: 05001-100 SAO PAULO
CPF/CNPJ: 132.925.203-13 e INSC.EST. ISENTO
Cliente: 00334400 - CFOP 5555 (Venda de en. elétrica a não contribuinte)

Informações de Leitura

Anterior	Atual	Próxima	Entrega da Conta	Leitura	IRR
15 JUN	15 JUL	17 AGO	17 JUL	970	0000

Sua Instalação

Medidor	Fator Multiplicador	Classe	Faturamento
459324	1	Residencial	Bifásico

Base de Cálculo R$ 43,49
ICMS - Lei Estadual 6374 de 01/03/89
Alíquota 12% - Valor R$ 5,22

Conjunto Elétrico

	DEC	FEC	DIC	FIC	DMIC
Limite Permitido	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Verificado	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Valor da Nota Fiscal 43,49

Valor da Fatura a Pagar 47,29

Demonstrativo - Resolução 166/2005

Composição da Tarifa	R$
Energia	17,82
Serviço de Distribuição	11,32
Transmissão	3,84
Encargos Setoriais	3,89
Tributos	7,42

Histórico de Consumo kWh

Mês	kWh
JUN/09	184
MAI/09	125
ABR/09	152
MAR/09	137
FEV/09	124
JAN/09	83
DEZ/08	21
NOV/08	11
	0
	0
	0
	0

Tensão Nominal 127/220 (BT) V
Tensão Mínima 116/201 V
Tensão Máxima 133/231 V

Informações do Faturamento
- Unidade Consumidora faturada pela Tarifa Residencial Plena.
- Importante: A falta de pagamento desta fatura implicará na suspensão do fornecimento de energia elétrica a partir do 16º dia da data de vencimento nos termos da resolução ANEEL nº. 456/00 art. 91 e leis federais nºs. 8.987 de 13/02/1995 e 9.427 de 26/12/1996.
- O pagamento desta conta não quita débitos anteriores.
- Sobre a conta paga após o vencimento incidirão multa de 2%, juros de mora de 0,033% ao dia (Lei 10.438 de 26/04/2002) e atualização financeira a serem incluídos em conta futura.

Reservado ao Fisco
1E58.82EA.FC34.1E58.0888.1E58.1E58.1E58
Cadastre sua conta em Débito Automático através do código 100000027000
Nota Fiscal Série B Nº 000000010

AES Eletropaulo

Nota Fiscal Série B Nº 000000010 **Conta de Energia Elétrica**

Fatura nº	Data de Emissão	Conta Referente a	Nº Instalação	Consumo kWh	Vencimento	Total a Pagar R$
003400890042	15 JUL 2009	JUL 2009	000006630	132,0	24 JUL 2009	47,29

FABIO

000600000001 000900000004 000420600000 000700074000

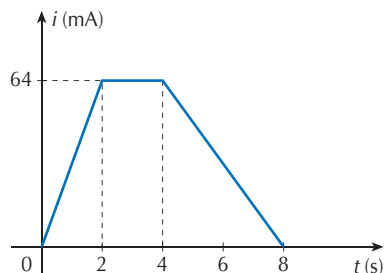
EXERCÍCIOS PROPOSTOS DE RECAPITULAÇÃO

P. 99 Um fio percorrido por uma corrente de 1,0 A deve conduzir, através de uma seção transversal, uma carga de 3,6 C. Qual o intervalo de tempo necessário para que isso ocorra?

P. 100 (IME-RJ) A intensidade da corrente elétrica em um condutor metálico varia, com o tempo, de acordo com o gráfico ao lado. Sendo a carga elementar $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C, determine:

a) a carga elétrica que atravessa uma seção do condutor em 8 s;

b) o número de elétrons que atravessa uma seção do condutor durante esse mesmo tempo;

c) a intensidade média de corrente entre os instantes zero e 8 s.

P. 101 (UFG-GO) As cargas e os tempos de duração das baterias de 6 V, para um certo tipo de telefone celular, são dados na tabela ao lado.

a) Qual a quantidade de carga (em coulombs) fornecida pela bateria de 0,80 Ah?

b) Calcule a intensidade média da corrente elétrica e a potência média fornecidas pela bateria de 0,80 Ah.

carga (Ah)	tempo (min)
0,30	40
0,38	50
0,55	70
0,80	110
1,10	150

P. 102 (Vunesp) Um aparelho elétrico para ser ligado no acendedor de cigarros de automóveis, comercializado nas ruas de São Paulo, traz a seguinte instrução:

Tensão de alimentação: 12 W
Potência consumida: 180 V

Essa instrução foi escrita por um fabricante com bons conhecimentos práticos, mas descuidado quanto ao significado e uso corretos das unidades do SI (Sistema Internacional), adotado no Brasil.

a) Reescreva a instrução, usando corretamente as unidades de medida do SI.

b) Calcule a intensidade da corrente elétrica utilizada pelo aparelho.

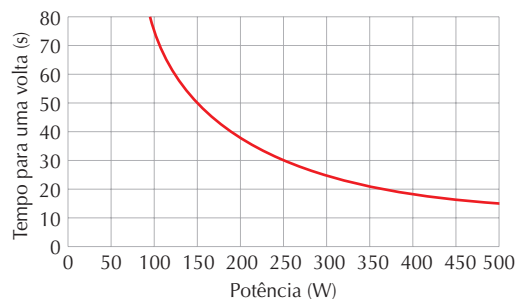
P. 103 (Vunesp) Normalmente, os aparelhos elétricos têm um manual de instruções ou uma plaqueta que informam a potência que absorvem da rede elétrica para funcionar. Porém, se essa informação não estiver disponível, é possível obtê-la usando o medidor de energia elétrica da entrada da residência. Além de mostradores que permitem a leitura do consumo de cada mês, o medidor tem um disco que gira quando a energia elétrica está sendo consumida. Quanto mais energia se consome, mais rápido gira o disco.

Usando esse medidor, um estudante procedeu da seguinte forma para descobrir a potência elétrica de um aparelho que possuía.

- Inicialmente, desconectou todos os aparelhos das tomadas e apagou todas as luzes, e o disco cessou de girar.
- Em seguida, ligou apenas uma lâmpada de potência conhecida e mediu o tempo que o disco levou para dar uma volta completa.
- Prosseguindo, ligou ao mesmo tempo duas, depois três, depois quatro, ... lâmpadas conhecidas, repetindo o procedimento da medida. A partir dos dados obtidos, construiu o gráfico do tempo gasto pelo disco para dar uma volta completa em função da potência absorvida da rede, mostrado na figura.
- Finalmente, ligando apenas o aparelho cuja potência desejava conhecer, observou que o disco levava aproximadamente 30 s para dar uma volta completa.

Tempo para uma volta (s): 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80
Potência (W): 0, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500

a) Qual a potência do aparelho?

b) O tempo gasto pelo disco e a potência absorvida são grandezas diretamente proporcionais ou inversamente proporcionais? Justifique sua resposta.

P. 104 Sabendo-se que 20 lâmpadas de 100 watts e 10 de 200 watts permanecem acesas 5 horas por dia, pergunta-se: qual o consumo de energia elétrica, em kWh, no período de 30 dias?

P. 105 (Fuvest-SP) Um kWh é a energia consumida por um aparelho de 1.000 W funcionando durante uma hora. Considere uma torneira elétrica com potência de 2.000 W.

a) Supondo que o preço de 1 kWh de energia elétrica seja R$ 0,20, qual o gasto mensal da torneira funcionando meia hora por dia?

b) Qual a energia, em joules, consumida pela torneira em 1 min?

P. 106 Um chuveiro elétrico tem potência de 3.000 W e uma lâmpada incandescente tem potência de 60 W. Quanto tempo a lâmpada deve ficar ligada para consumir a mesma energia que o chuveiro, durante um banho de 20 minutos?

P. 107 (PUC-SP) O que consome mais energia elétrica: um banho de 30 minutos com um chuveiro elétrico de potência 5.000 W ou uma lâmpada de 60 W que permanece ligada 24 horas? Justifique.

P. 108 (Unicamp-SP) Quando o alumínio é produzido a partir da bauxita, o gasto de energia para produzi-lo é de 15 kWh/kg. Já para o alumínio reciclado a partir de latinhas, o gasto de energia é de apenas 5% do gasto a partir da bauxita.

a) Em uma dada cidade, 50.000 latinhas são recicladas por dia. Quanto de energia elétrica é poupada nessa cidade (em kWh)? Considere que a massa de cada latinha é de 16 g.

b) Um forno de redução de alumínio produz 400 kg do metal, a partir da bauxita, em um período de 10 horas. A cuba eletrolítica desse forno é alimentada com uma tensão de 40 V. Qual a corrente que alimenta a cuba durante a produção? Despreze as perdas.

TESTES PROPOSTOS

T. 104 (PUC-PR) Uma corrente elétrica de 10 A é mantida em um condutor metálico durante dois minutos. Pede-se a carga elétrica que atravessa uma seção do condutor.

a) 120 C
b) 1.200 C
c) 200 C
d) 20 C
e) 600 C

T. 105 (PUC-SP) Uma corrente elétrica de intensidade 11,2 μA percorre um condutor metálico. A carga elementar é $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C. O tipo e o número de partículas carregadas que atravessam uma seção transversal desse condutor por segundo são:

a) prótons; $7{,}0 \cdot 10^{13}$ partículas.
b) íons de metal; $14{,}0 \cdot 10^{16}$ partículas.
c) prótons; $7{,}0 \cdot 10^{19}$ partículas.
d) elétrons; $14{,}0 \cdot 10^{16}$ partículas.
e) elétrons; $7{,}0 \cdot 10^{13}$ partículas.

T. 106 Um ampère corresponde a:

I. um coulomb por segundo.

II. passagem de $6{,}25 \cdot 10^{18}$ cargas elementares por segundo através de uma seção transversal de um condutor (carga elementar $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C).

a) Só a afirmação I é correta.
b) Só a afirmação II é correta.
c) As duas afirmações estão corretas.
d) As duas afirmações estão incorretas.

T. 107 (PUC-SP)

Na tira, Garfield, muito maldosamente, reproduz o famoso experimento de Benjamin Franklin, com a diferença de que o cientista, na época, teve o cuidado de isolar a si mesmo de seu aparelho e de manter-se protegido da chuva de modo que não fosse eletrocutado como tantos outros que tentaram reproduzir o seu experimento.

Franklin descobriu que os raios são descargas elétricas produzidas geralmente entre uma nuvem e o solo ou entre partes de uma mesma nuvem que estão eletrizadas com cargas opostas. Hoje sabe-se que uma descarga elétrica na atmosfera pode gerar correntes elétricas da ordem de 10^5 ampères e que as tempestades que ocorrem no nosso planeta originam, em média, 100 raios por segundo. Isso significa que a ordem de grandeza do número de elétrons que são transferidos, por segundo, por meio das descargas elétricas, é, aproximadamente:

a) 10^{22} **b)** 10^{24} **c)** 10^{26} **d)** 10^{28} **e)** 10^{30}

(Dado: carga de um elétron $-1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C)

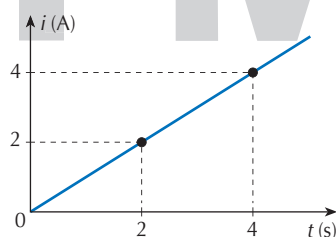
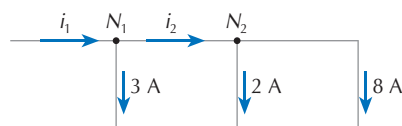
T. 108 Ao acionar um interruptor de uma lâmpada elétrica, esta se acende quase instantaneamente, embora possa estar a centenas de metros de distância. Isso ocorre porque:

a) a velocidade dos elétrons na corrente elétrica é igual à velocidade da luz.
b) os elétrons se põem em movimento quase imediatamente em todo o circuito, embora sua velocidade média seja relativamente baixa.
c) a velocidade dos elétrons na corrente elétrica é muito elevada.
d) não é necessário que os elétrons se movimentem para que a lâmpada se acenda.

T. 109 (Uece) Em um fio de cobre de 1 cm de diâmetro há uma corrente de 66 ampères. Considere a existência de $8{,}6 \cdot 10^{28}$ elétrons livres por metro cúbico no cobre e a carga q de um elétron igual a $-1{,}6 \cdot 10^{-19}$ coulomb. A distância percorrida por um desses elétrons livres, em uma hora, é aproximadamente igual a um:

a) centímetro
b) palmo
c) metro
d) quilômetro

T. 110 (Unisa-SP) No diagrama, temos a representação da intensidade de corrente (i) em um fio condutor em função do tempo (t). A quantidade de carga elétrica, em C, que atravessa uma secção transversal do condutor entre 2 s e 4 s é:

a) 4
b) 8
c) 1
d) 6
e) 2

T. 111 No trecho de circuito esquematizado na figura têm-se dois nós, N_1 e N_2.

As intensidades das correntes i_1 e i_2 são respectivamente iguais a:

a) 5 A e 8 A
b) 5 A e 10 A
c) 13 A e 10 A
d) 3 A e 2 A
e) 11 A e 10 A

T. 112 (Unisa-SP) Um chuveiro elétrico quando sob ddp de 220 V é atravessado por uma corrente elétrica de intensidade 10 A. Qual é a energia elétrica consumida, em kWh, em 15 min de funcionamento?

a) 33
b) 3,3
c) 1,21
d) 5,5
e) 0,55

T. 113 (UEPB) Uma residência usa alguns equipamentos elétricos, cuja potência de cada um e o tempo de funcionamento em um mês encontram-se especificados na tabela abaixo.

Equipamento	Quantidade	Tempo de funcionamento	Potência (W)
Lâmpada	04	120 h	60 (cada uma)
Ferro elétrico	01	30 h	600
Televisor	01	60 h	120

A energia elétrica total consumida, em quilowatt-hora (kWh), pelos equipamentos vale:

a) 42,0
b) 66,0
c) 32,0
d) 54,0
e) 72,0

T. 114 (Olimpíada Paulista de Física) Preocupadas com o "apagão", dona Josefa, dona Carolina e dona Eneida tomaram algumas providências para economizar energia elétrica:

I. Dona Josefa deixou de usar o forno de micro-ondas de 2.000 W, que costumava ligar durante 1 hora por dia.
II. Dona Carolina trocou 10 lâmpadas incandescentes de 100 W cada, que ficavam acesas durante 5 horas diárias, por igual quantidade de lâmpadas fluorescentes de 20 W.
III. Dona Eneida conseguiu reduzir de 1 hora para 0,5 hora por dia o tempo de banho de chuveiro elétrico de 4.000 W.

Sabendo-se que a energia elétrica é paga em kWh e que a quantidade de energia é determinada pelo produto da potência em kW (1.000 W) pelo tempo de uso em horas e considerando-se as providências anteriores, podemos afirmar que:

a) Todas economizaram a mesma quantidade de energia elétrica.
b) Dona Carolina foi quem conseguiu economizar mais energia elétrica.
c) Dona Eneida foi quem economizou menos energia elétrica.
d) Dona Josefa economizou mais energia elétrica do que dona Carolina.
e) Não houve economia de energia elétrica nas três situações, havendo apenas economia na potência elétrica dos aparelhos utilizados.

T. 115 (UFTM-MG) Após um mês de incansáveis ... *apaga a luz!...*, ... *desliga o chuveiro!...* a esposa comunica ao marido a redução de 130 kWh no consumo mensal de energia. Não dando o braço a torcer, o marido atribui ao sucesso da economia o fato de não mais se ter deixado acesa durante a noite aquela lâmpada de 100 W do corredor, que sua esposa achava indispensável ficar acesa. Apesar de o não uso dessa lâmpada ter contribuído para a economia obtida, ela jamais poderia ter sido a única responsável, uma vez que, com a energia economizada, essa lâmpada poderia permanecer ininterruptamente acesa por, aproximadamente:

a) 33 dias
b) 38 dias
c) 46 dias
d) 54 dias
e) 61 dias

T. 116 (UFRGS-RS) Para iluminar sua barraca, um grupo de campistas liga uma lâmpada a uma bateria de automóvel. A lâmpada consome uma potência de 6 W quando opera sob uma tensão de 12 V. A bateria traz as seguintes especificações: 12 V, 45 A · h, sendo o último valor a carga máxima que a bateria é capaz de armazenar. Supondo-se que a bateria seja ideal e que esteja com a metade da carga máxima, e admitindo-se que a corrente fornecida por ela se mantenha constante até a carga se esgotar por completo, quantas horas a lâmpada poderá permanecer funcionando continuamente?

a) 90 h
b) 60 h
c) 45 h
d) 22 h 30 min
e) 11 h 15 min

T. 117 (Fuvest-SP) No medidor de energia elétrica usado na medição do consumo de residências, há um disco, visível externamente, que pode girar. Cada rotação completa do disco corresponde a um consumo de energia elétrica de 3,6 watt-hora. Mantendo-se, em uma residência, apenas um equipamento ligado, observa-se que o disco executa uma volta a cada 40 segundos. Nesse caso, a potência "consumida" por esse equipamento é de, aproximadamente:

a) 36 W
b) 90 W
c) 144 W
d) 324 W
e) 1.000 W

> A quantidade de energia elétrica de 3,6 watt-hora é definida como aquela que um equipamento de 3,6 W consumiria se permanecesse ligado durante 1 hora.

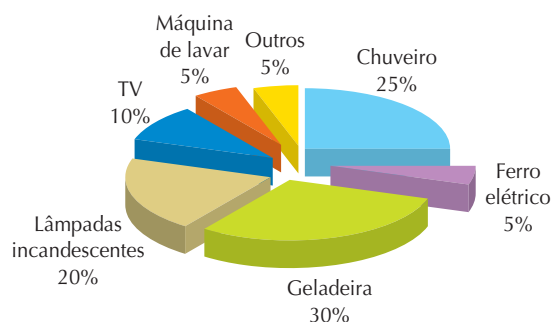
T. 118 (Vunesp) As companhias de eletricidade geralmente usam medidores calibrados em quilowatt-hora (kWh). Um kWh representa o trabalho realizado por uma máquina desenvolvendo potência igual a 1 kW durante 1 hora. Numa conta mensal de energia elétrica de uma residência com 4 moradores, leem-se, entre outros, os seguintes valores:

Consumo (kWh)	Total a pagar (R$)
300	75,00

Cada um dos 4 moradores toma um banho diário, um de cada vez, num chuveiro elétrico de 3 kW. Se cada banho tem duração de 5 minutos, o custo ao final de um mês (30 dias) da energia consumida pelo chuveiro é de:

a) R$ 4,50
b) R$ 7,50
c) R$ 15,00
d) R$ 22,50
e) R$ 45,00

O enunciado a seguir refere-se aos testes **T.119** e **T.120**.

(Enem-MEC) A distribuição média, por tipo de equipamento, do consumo de energia elétrica nas residências no Brasil é apresentada no gráfico abaixo.

T. 119 Em associação com os dados do gráfico, considere as variáveis:

I. potência do equipamento;
II. horas de funcionamento;
III. número de equipamentos.

O valor das frações porcentuais do consumo de energia depende de:

a) I, apenas
b) II, apenas
c) I e II, apenas
d) II e III, apenas
e) I, II e III

T. 120 Como medida de economia, em uma residência com 4 moradores, o consumo mensal médio de energia elétrica foi reduzido para 300 kWh. Se essa residência obedece à distribuição dada no gráfico, e se nela há um único chuveiro de 5.000 W, pode-se concluir que o banho diário de cada morador passou a ter uma duração média, em minutos, de:

a) 2,5
b) 5,0
c) 7,5
d) 10,0
e) 12,0

UNIDADE B

Capítulo 6

Resistores

Os resistores são elementos de circuito cuja principal propriedade é a resistência elétrica.

6.1 Considerações iniciais

Os resistores são elementos de circuito que convertem toda energia elétrica consumida em energia térmica. A conversão de energia elétrica em energia térmica recebe o nome de efeito térmico ou efeito Joule.

6.2 Resistência elétrica. Lei de Ohm

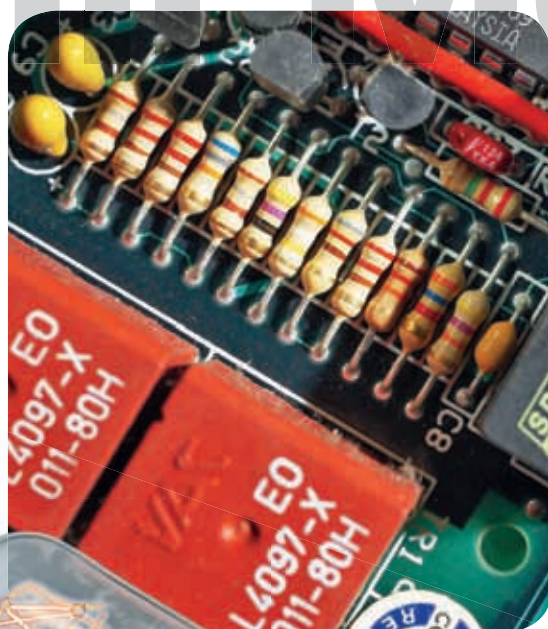
Em um resistor ôhmico, mantido a temperatura constante, a ddp aplicada é diretamente proporcional à intensidade da corrente elétrica que o atravessa.

6.3 Lei de Joule

A energia elétrica dissipada em um resistor num dado intervalo de tempo é diretamente proporcional ao quadrado da intensidade de corrente que o percorre.

6.4 Resistividade

A resistência elétrica de um resistor depende da temperatura em que ele se encontra, do material que o constitui, do seu comprimento e da área de sua seção transversal. A grandeza que caracteriza o material é a resistividade. Seu valor depende da temperatura.

Diversos aparelhos domésticos são dotados de resistores, como secadores de cabelo, fogões elétricos, aquecedores e lâmpadas incandescentes. Em todos eles a função do resistor é a de transformar energia elétrica em energia térmica, isto é, dissipar energia elétrica.

Os resistores podem desempenhar outras funções, como a de limitar a intensidade da corrente elétrica em circuitos eletrônicos. Nesse caso, sua função não é a de dissipar energia elétrica, embora isso aconteça inevitavelmente.

Seção 6.1

Considerações iniciais

Objetivos

- Conhecer o efeito Joule.
- Caracterizar os resistores.
- Identificar as funções dos resistores em um circuito elétrico.
- Perceber a presença de resistores em aparelhos elétricos.

Termos e conceitos

- **dissipar energia elétrica**
- **resistência elétrica**

1 Efeito térmico ou efeito Joule

Quando a corrente elétrica atravessa um condutor, ocorre a transformação de energia elétrica em energia térmica, devido à colisão dos elétrons livres com os átomos do condutor. Esse fenômeno é denominado **efeito térmico** ou **efeito Joule**.

Em virtude das colisões, os átomos do condutor passam a vibrar mais intensamente e, em consequência, ocorre elevação da temperatura do condutor.

2 Resistores

Existem elementos de circuitos cuja função, entre outras, é a de transformar energia elétrica em energia térmica (dissipar energia elétrica) ou limitar a intensidade da corrente elétrica em circuitos eletrônicos. Tais elementos recebem o nome de **resistores**.

São exemplos de resistores que se destinam a dissipar energia elétrica: os filamentos de tungstênio das lâmpadas elétricas incandescentes; fios de certas ligas metálicas (como **nicromo**: liga de níquel e de cromo), enrolados em hélice cilíndrica, utilizados em chuveiros, torneiras elétricas, secadores de cabelos etc.

Os resistores utilizados para limitar a intensidade de corrente que passa por determinados componentes eletrônicos não têm a finalidade de dissipar energia elétrica, embora isso aconteça inevitavelmente. Comumente, são constituídos de um filme de grafite depositado de modo contínuo sobre um suporte cerâmico ou enrolado em forma de faixas helicoidais.

Os resistores têm como principal propriedade elétrica uma grandeza física denominada **resistência elétrica**.

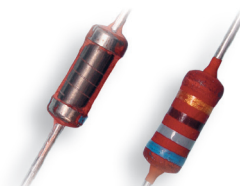
A definição de resistência elétrica será apresentada na Seção 6.2. Muitos resistores que se destinam a dissipar energia são, algumas vezes, chamados impropriamente de "resistências". Você certamente já ouviu frases do tipo "é preciso trocar a resistência do chuveiro" ou "a resistência do secador de cabelos queimou". Na verdade, a resistência elétrica é uma propriedade física do resistor.

Na torradeira, no secador e no ferro elétrico, a energia elétrica se converte em energia térmica (efeito Joule) quando a corrente elétrica passa pelo resistor do aparelho.

Tipos de resistores

Em circuitos elétricos, o **resistor de fio** e o **resistor de carvão** são amplamente utilizados. O primeiro nada mais é que um pedaço de fio, composto por ligas metálicas. Não sendo possível obter áreas de seções transversais demasiadamente pequenas, para se obterem valores razoáveis de resistência, são necessários fios de comprimento muito grande; costuma-se, assim, enrolar o fio sobre um suporte isolante.

O resistor de carvão consta de um suporte isolante coberto de fina camada de carvão com dois terminais metálicos. É muito usado em circuitos de rádio e televisão. Devido à alta resistividade da grafite, podem-se obter resistores de alta resistência e de pequenas dimensões.

Resistor fotossensível: sua resistência elétrica varia conforme a incidência da luz.

Resistor de carvão em duas situações: aberto, para mostrar o suporte coberto pela lâmina de carvão, e fechado, com seu revestimento externo apresentando faixas coloridas.

Conteúdo digital Moderna PLUS http://www.modernaplus.com.br
A Física em nosso Mundo: *O código de cores*

Seção 6.2

Resistência elétrica. Lei de Ohm

Objetivos

- Conhecer a lei de Ohm.
- Conceituar resistor ôhmico.
- Saber o significado físico da resistência elétrica.
- Conhecer a unidade de resistência elétrica no SI.
- Analisar a curva característica de um resistor ôhmico.

Termos e conceitos

- **condutores não lineares**
- **resistência aparente**

Considere o resistor da **figura 1**, mantido a uma temperatura constante, percorrido por corrente elétrica de intensidade i, que tem entre seus terminais uma ddp U.

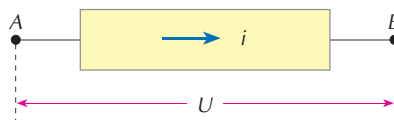



Figura 1. Resistor mantido em temperatura constante.

Mudando-se a ddp sucessivamente para U_1, U_2, ..., o resistor passa a ser percorrido por correntes de intensidades i_1, i_2, ...

Ohm* verificou, experimentalmente, que, **mantida a temperatura constante, o quociente da ddp aplicada pela respectiva intensidade de corrente elétrica resultava em uma constante característica do resistor:**

$$\frac{U}{i} = \frac{U_1}{i_1} = \frac{U_2}{i_2} = \ldots = \text{constante} = R$$

A grandeza R assim introduzida foi denominada **resistência elétrica do resistor**. A resistência elétrica não depende da ddp aplicada ao resistor nem da intensidade de corrente elétrica que o percorre, mas do condutor e de sua temperatura.

* **OHM**, Georg Simon (1787-1854), físico alemão, lecionou na Escola Politécnica de Nuremberg e depois na Universidade de Munique. É conhecido principalmente por seus trabalhos sobre corrente elétrica, expostos em sua *Teoria Matemática dos Circuitos Elétricos* (1827), em que apresentou a noção de resistência elétrica e a lei que leva seu nome.

V3_P1_UN_B_CAP_06.indd 133 19.09.09 09:29:17

De modo geral, tem-se:

$$\frac{U}{i} = R \quad \text{ou} \quad U = R \cdot i$$

Essas fórmulas traduzem a **lei de Ohm**, que relaciona a causa do movimento das cargas elétricas (a ddp U) com o efeito (passagem da corrente elétrica i), podendo ser enunciada da seguinte maneira:

> O quociente da ddp nos terminais de um resistor pela intensidade de corrente elétrica que o atravessa é constante e igual à resistência elétrica do resistor.

Um resistor que obedece à lei de Ohm é denominado **resistor ôhmico**.

Em esquemas de circuito, um resistor é representado pelo símbolo ilustrado na **figura 2**, colocando-se, acima ou abaixo, o valor de sua resistência elétrica.

Figura 2. Representação de um resistor em circuitos elétricos.

De $i = \frac{U}{R}$, observamos que, em resistores diferentes sob mesma ddp, é atravessado por corrente elétrica de menor intensidade aquele que tiver maior valor de R. Desse modo, a resistência elétrica aparece como uma dificuldade à passagem da corrente elétrica, o que justifica sua denominação.

Quando a resistência elétrica é muito pequena, como nos fios de cobre de ligação dos elementos do circuito da **figura 3**, estes são representados por uma linha contínua. Nessas condições, os fios são denominados simplesmente **condutores**, e sua finalidade é ligar os elementos do circuito. Nesses fios, o efeito Joule pode ser desprezado. Na lâmpada ocorre o efeito Joule e, portanto, ela apresenta uma resistência elétrica R. No esquema do circuito, o gerador é representado por dois traços paralelos. O traço mais longo representa o polo positivo, e o mais curto, o negativo.

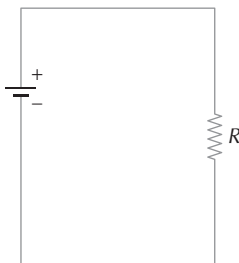



Figura 3. Circuito elétrico formado por uma pilha (gerador), uma lâmpada e por fios de ligação de resistência elétrica desprezível. À direita, a representação esquemática do circuito.

Unidade de resistência elétrica

No Sistema Internacional de Unidades, a unidade de resistência elétrica denomina-se **ohm** (símbolo Ω), sendo que $1\ \Omega = \frac{1\ V}{1\ A}$.

É de emprego frequente um múltiplo do ohm: o **quiloohm** (**kΩ**), que vale: $1\ k\Omega = 10^3\ \Omega$

Conteúdo digital Moderna PLUS http://www.modernaplus.com.br
História da Física: *Da construção da primeira pilha à invenção da lâmpada elétrica*

Entre na rede Nos endereços eletrônicos http://www.walter-fendt.de/ph14br/ohmslaw_br.htm e http://micro.magnet.fsu.edu/electromag/java/ohmslaw/ (acesso em julho/2009), você pode verificar a lei de Ohm.

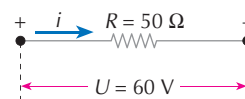
EXERCÍCIO RESOLVIDO

R. 44 Um resistor tem resistência igual a 50 Ω, sob a ddp $U = 60$ V. Calcule a intensidade de corrente elétrica que o atravessa.

Solução:

Pela lei de Ohm, $U = R \cdot i$. Sendo $U = 60$ V e $R = 50$ Ω, temos:

$$i = \frac{U}{R} \Rightarrow i = \frac{60}{50} \Rightarrow \boxed{i = 1{,}2 \text{ A}}$$

Resposta: 1,2 A

EXERCÍCIO PROPOSTO

P. 109 Um resistor ôhmico, quando submetido a uma ddp de 20 V, é atravessado por uma corrente elétrica de intensidade 4,0 A. Qual a ddp nos terminais do resistor quando este é percorrido por uma corrente elétrica de 1,2 A?

Curvas características de resistores ôhmicos e não ôhmicos

A lei de Ohm é considerada como a equação de um resistor ôhmico de resistência elétrica R:

$$\boxed{U = R \cdot i}$$

Tem-se uma função linear entre a ddp (U) e a corrente elétrica (i) e, por isso, um resistor ôhmico é também chamado **condutor linear**.

Na **figura 4**, o gráfico de U em função de i é uma reta que passa pela origem, constituindo, assim, a curva característica de um resistor ôhmico. O coeficiente angular da reta ($\text{tg}\ \theta$) é numericamente igual à **resistência elétrica** do resistor, ou seja:

$$\text{tg}\ \theta \overset{N}{=} \frac{U}{i} = R$$

Para resistores que não obedecem à lei de Ohm, a curva característica passa pela origem, mas não é uma reta (**fig. 5**). Esses resistores não ôhmicos são denominados **condutores não lineares**. Para eles, define-se **resistência aparente** em cada ponto da curva pelo quociente:

$$\boxed{R_{ap.} = \frac{U_1}{i_1} \quad \text{e} \quad R'_{ap.} = \frac{U_2}{i_2}}$$

Nos condutores não lineares, a curva característica é sempre determinada experimentalmente. A resistência aparente em cada ponto será numericamente igual ao coeficiente angular da secante que passa pela origem e pelo ponto considerado ($\text{tg}\ \beta = R_{ap.}$ e $\text{tg}\ \beta' = R'_{ap.}$).

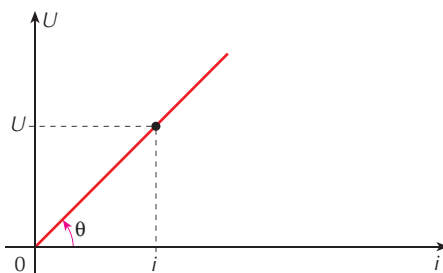



Figura 4. Curva característica de um resistor ôhmico.

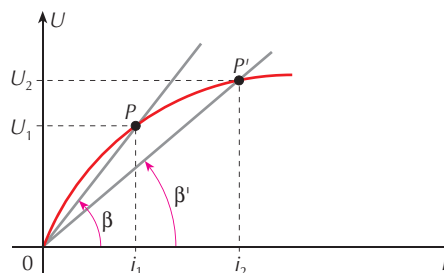
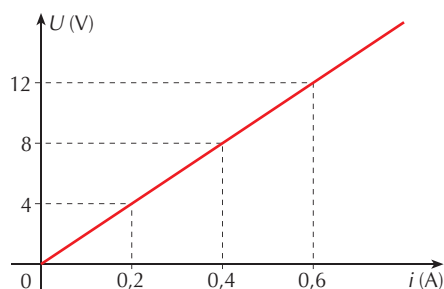



Figura 5. Curva característica de um resistor não ôhmico.

R. 45 Aplica-se uma ddp nos terminais de um resistor e mede-se a intensidade de corrente elétrica que o atravessa. Repete-se a operação para ddps diferentes e constrói-se o gráfico abaixo, obtendo a curva característica do resistor. Determine o valor da resistência elétrica desse resistor.

Solução:

Para um resistor ôhmico, qualquer par de valores (i, U) determina a resistência elétrica do aparelho. Assim, quando U = 8 V, do gráfico obtém-se i = 0,4 A, logo:

$$R = \frac{U}{i} \Rightarrow R = \frac{8}{0{,}4} \Rightarrow \boxed{R = 20\ \Omega}$$

Resposta: 20 Ω

R. 46 Variando-se a ddp aplicada a um condutor e medindo-se as intensidades de corrente elétrica, obtêm-se os resultados mostrados na tabela abaixo.

U (V)	0	16	42	75	110	150
i (A)	0	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25

a) Verifique se o condutor é linear.

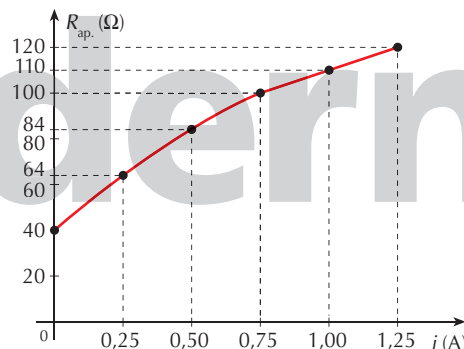
b) Esboce o gráfico de sua resistência elétrica em função da intensidade de corrente elétrica i. Considere que a resistência elétrica do condutor é de 40 Ω, quando i = 0.

Solução:

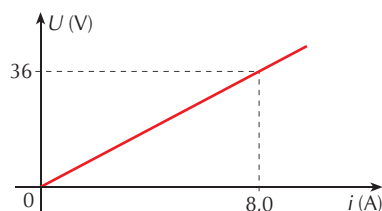
a) Verifiquemos o quociente $\frac{U}{i}$, observando que, quando U = 0, temos i = 0; quando não há ddp (causa), consequentemente não há corrente (efeito).

U (V)	16	42	75	110	150
i (A)	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25
$\frac{U}{i}$ (Ω)	64	84	100	110	120

Como o quociente $\frac{U}{i}$ não é constante, o condutor é não linear. Os valores obtidos para $\frac{U}{i}$ correspondem à resistência aparente ($R_{ap.}$) para cada valor de corrente elétrica.

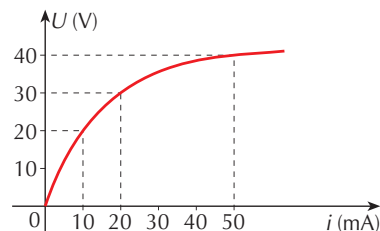
b) No gráfico abaixo, representamos a resistência aparente ($R_{ap.}$) do condutor em função da intensidade de corrente elétrica que o percorre. Observamos que, se o condutor fosse linear, a resistência aparente seria constante e o gráfico, em função da intensidade de corrente elétrica, seria uma reta paralela ao eixo das abscissas.

Resposta: O condutor é não linear e sua resistência aparente varia em função da intensidade de corrente elétrica segundo o gráfico acima.

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

P. 110 O gráfico representa a curva característica de um resistor ôhmico.

Determine:

a) a resistência elétrica do resistor;

b) a ddp nos terminais do resistor quando percorrido por corrente elétrica de intensidade 1,6 A.

P. 111 Um condutor X tem como curva característica a que é mostrada abaixo.

a) Calcule sua resistência aparente quando é percorrido pela corrente de 10 mA.

b) Esboce o gráfico da resistência aparente de X em função da intensidade de corrente elétrica i.

Seção 6.3

Lei de Joule

Objetivos

- Compreender a lei de Joule.
- Conhecer as diversas formas de calcular a potência elétrica dissipada por um resistor.

Um resistor transforma toda a energia elétrica recebida de um circuito em **energia** térmica; daí ser usual dizer que **um resistor dissipa a energia elétrica que recebe do circuito**. Assim, a potência elétrica consumida por um resistor é dissipada. Como sabemos, essa potência é dada por $Pot = U \cdot i$.

Pela lei de Ohm ($U = R \cdot i$) tem-se $Pot = (R \cdot i) \cdot i$. Logo:

$$Pot = R \cdot i^2$$

A energia elétrica transformada em energia térmica ao fim de um intervalo de tempo Δt é dada por:

$$E_{el.} = Pot \cdot \Delta t \Rightarrow E_{el.} = R \cdot i^2 \cdot \Delta t$$

Essa última fórmula traduz a lei de Joule, que pode ser enunciada da seguinte maneira:

A energia elétrica dissipada num resistor, num dado intervalo de tempo Δt, é diretamente proporcional ao quadrado da intensidade de corrente elétrica que o percorre.

Sendo $i = \frac{U}{R}$, a potência elétrica dissipada pode, também, ser dada por: $Pot = \frac{U^2}{R}$

Quando a ddp é constante, a potência elétrica dissipada num resistor é inversamente proporcional à sua resistência elétrica.

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

R. 47 Um resistor de resistência elétrica R = 20 Ω é percorrido por uma corrente elétrica de intensidade 3,0 A. Determine:

a) a potência elétrica consumida pelo resistor;

b) a energia elétrica consumida no intervalo de tempo de 20 s.

Solução:

a) Sendo dados R = 20 Ω e i = 3,0 A, temos:

$$Pot = R \cdot i^2 \Rightarrow Pot = 20 \cdot (3{,}0)^2 \Rightarrow \boxed{Pot = 1{,}8 \cdot 10^2 \text{ W}}$$

b) A energia elétrica consumida pelo resistor, no intervalo de tempo Δt = 20 s, é dada por:

$$E_{el.} = Pot \cdot \Delta t \Rightarrow E_{el.} = 1{,}8 \cdot 10^2 \cdot 20 \Rightarrow \boxed{E_{el.} = 3{,}6 \cdot 10^3 \text{ J}}$$

Resposta: a) $1{,}8 \cdot 10^2$ W; b) $3{,}6 \cdot 10^3$ J

R. 48 Em 0,5 kg de água contida em um recipiente mergulha-se, durante 7 min, um resistor de resistência elétrica 2 Ω. Se o resistor é percorrido por uma corrente elétrica de intensidade 5 A, calcule a elevação da temperatura da água, supondo que não haja mudança de estado.
Dados: calor específico da água 1 cal/g · °C e 1 cal = 4,2 J.

Solução:
A energia elétrica consumida pelo resistor é transformada em calor, determinando uma elevação da temperatura da água. Desse modo, temos:

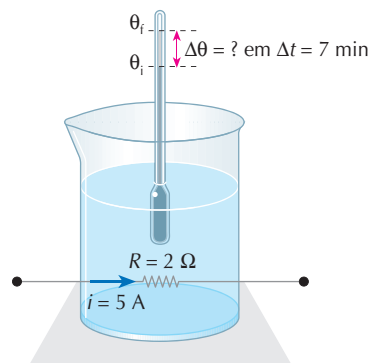
$$E_{el.} = Q$$

Como $E_{el.} = Pot \cdot \Delta t$ e $Q = mc \cdot \Delta\theta$, temos:

$$Pot \cdot \Delta t = mc \cdot \Delta\theta \Rightarrow R \cdot i^2 \cdot \Delta t = mc \cdot \Delta\theta$$

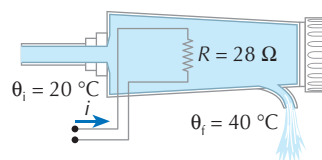
Sendo $R = 2\ \Omega$, $i = 5$ A, $\Delta t = 7$ min $= 420$ s, $m = 0,5$ kg $= 500$ g e $c = 1$ cal/g · °C $= 4,2$ J/g · °C, pois 1 cal = 4,2 J, resulta:

$$2 \cdot 5^2 \cdot 420 = 500 \cdot 4,2 \cdot \Delta\theta \Rightarrow \boxed{\Delta\theta = 10\ °C}$$

Resposta: 10 °C

R. 49 Uma torneira elétrica fornece 2 ℓ/min de água à temperatura de 40 °C, sendo que a temperatura da água na entrada é de 20 °C. A resistência elétrica da torneira vale 28 Ω. Calcule a intensidade de corrente elétrica que atravessa o resistor da torneira. (Dados: densidade da água $d = 1$ kg/ℓ, calor específico da água $c = 1$ cal/g · °C e 1 cal = 4,2 J.)

Solução:
De $E_{el.} = Q$, temos: $Pot \cdot \Delta t = mc \cdot \Delta\theta \Rightarrow R \cdot i^2 \cdot \Delta t = mc \cdot \Delta\theta$ ①
A massa de água fornecida em $\Delta t = 1$ min $= 60$ s é dada por:
$m = dV$, em que $d = 1$ kg/ℓ e $V = 2$ ℓ
Assim: $m = 1\ \text{kg/ℓ} \cdot 2\ \text{ℓ} \Rightarrow m = 2\ \text{kg} \Rightarrow m = 2 \cdot 10^3\ \text{g}$
Sendo $R = 28\ \Omega$, $c = 1$ cal/g · °C $= 4,2$ J/g · °C, $\Delta\theta = 40\ °C - 20\ °C = 20\ °C$, a substituição em ① resulta em:

$$28 \cdot i^2 \cdot 60 = 2 \cdot 10^3 \cdot 4,2 \cdot 20 \Rightarrow i^2 = 100 \Rightarrow \boxed{i = 10\ A}$$

Resposta: 10 A

R. 50 Em um chuveiro elétrico lê-se a inscrição 2.200 W — 220 V.
a) Qual a resistência elétrica do chuveiro quando em funcionamento?
b) Quando ligado corretamente, qual a intensidade de corrente elétrica que o atravessa?
c) Estando o chuveiro ligado corretamente, o que se deve fazer na sua resistência elétrica para aumentar a potência elétrica dissipada?

Solução:
a) 2.200 W — 220 V significa potência $Pot = 2.200$ W quando a ddp é $U = 220$ V.

Como $Pot = \frac{U^2}{R}$, vem $R = \frac{U^2}{Pot}$. Assim: $R = \frac{(220)^2}{2.200} \Rightarrow \boxed{R = 22\ \Omega}$

b) Ligado corretamente, temos $U = 220$ V e, pela lei de Ohm:

$$i = \frac{U}{R} \Rightarrow i = \frac{220}{22} \Rightarrow \boxed{i = 10A}$$

c) Como a ddp $U = 220$ V permanece constante, e sendo $Pot = \frac{U^2}{R}$, conclui-se que, para aumentar a potência elétrica dissipada Pot, deve-se **diminuir a resistência elétrica R do chuveiro**. Por isso, quando se passa a chave de um chuveiro elétrico da posição "verão" para a posição "inverno", sua resistência elétrica diminui.

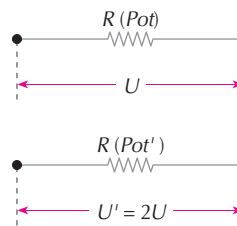
Resposta: a) 22 Ω; b) 10 A; c) Diminuir a resistência elétrica do chuveiro.

R. 51 Dobra-se a ddp aplicada a um resistor. O que acontece com a potência por ele dissipada?

R (Pot)
U
R (Pot′)
U′ = 2U

Solução:
A resistência elétrica R do resistor independe da ddp U. Como $Pot = \frac{U^2}{R}$, temos:

$$Pot' = \frac{(U')^2}{R} = \frac{(2U)^2}{R} = 4 \cdot \frac{U^2}{R} \Rightarrow \boxed{Pot' = 4 \cdot Pot}$$

Resposta: A potência dissipada torna-se quatro vezes maior.

R. 52 Um resistor dissipa 60 W de potência quando ligado sob ddp de 220 V. Supondo invariável a resistência elétrica do resistor, determine a potência elétrica que ele dissipa quando ligado sob ddp de 110 V.

Solução:
Sendo $Pot_1 = 60$ W, quando $U_1 = 220$ V, queremos determinar a potência Pot_2, quando $U_2 = 110$ V. Sendo a resistência elétrica R invariável, temos:

$$Pot_1 = \frac{(U_1)^2}{R} \quad ① \quad \text{e} \quad Pot_2 = \frac{(U_2)^2}{R} \quad ②$$

Dividindo ② por ①, temos:

$$\frac{Pot_2}{Pot_1} = \frac{(U_2)^2}{(U_1)^2} \Rightarrow \frac{Pot_2}{60} = \frac{110^2}{220^2} \Rightarrow \frac{Pot^2}{60} = \left(\frac{110}{220}\right)^2 \Rightarrow \frac{Pot_2}{60} = \frac{1}{4} \Rightarrow \boxed{Pot_2 = 15 W}$$

Resposta: A potência elétrica fica quatro vezes menor, isto é, passa de 60 W para 15 W.

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

P. 112 Em um recipiente estão colocados 10 kg de água e um resistor de 4,2 Ω. O resistor é ligado a um gerador durante 200 s. Um termômetro colocado dentro da água registra um aumento de temperatura de 8 °C. Sendo o calor específico da água 1 cal/g · °C e 1 cal = 4,2 J, calcule a intensidade de corrente elétrica que atravessa o resistor.

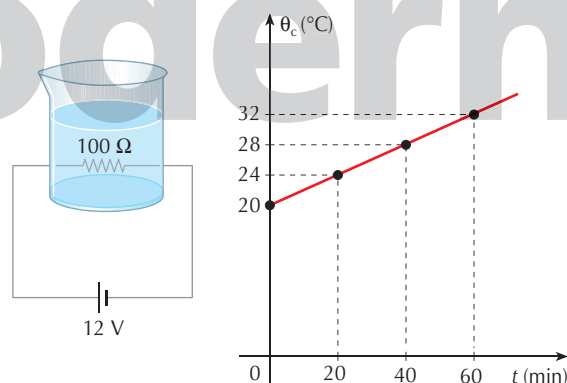
P. 113 Um aquecedor utiliza uma resistência elétrica de 20 Ω. Esse aquecedor é imerso em 1 litro de água a 10 °C e ligado a uma tomada, de modo que é percorrido por uma corrente elétrica de intensidade 10 A. Calcule em quanto tempo a temperatura da água atinge 60 °C.
(Dados: calor específico da água $c = 1$ cal/g · °C, 1 cal = 4,2 J e $d_{água} = 1{,}0$ kg/ℓ.)

P. 114 (UFPR) Um ebulidor de água é fabricado para funcionar com uma tensão de 220 V. Sabendo que o resistor nele existente tem uma resistência de 20 Ω, calcule:

a) a potência máxima que o ebulidor pode fornecer em funcionamento;

b) o tempo, em minutos, necessário para aquecer 10 kg de água, inicialmente à temperatura de 25 °C, até a temperatura de 90 °C. Considere o calor específico da água como sendo de $4{,}18 \cdot 10^3$ J/kg · °C, a capacidade térmica do ebulidor desprezível e que a potência dissipada por ele é constante.

P. 115 Um resistor tem seus terminais submetidos a uma certa ddp. Reduzindo à metade a resistência elétrica do resistor e mantida constante a ddp, o que acontece com a potência por ele dissipada?

P. 116 (UFRRJ) Um estudante utiliza um circuito elétrico, composto por uma bateria de 12 V e um resistor de 100 Ω, para aquecer uma certa quantidade de água, inicialmente a 20 °C, contida em um recipiente. O gráfico representa a temperatura da água, medida por um termômetro trazido pelo estudante, em função do tempo.

Dados o calor específico da água $c = 4{,}2$ J/g · °C e densidade da água $\mu = 1{,}0$ g/cm³, determine:

a) a quantidade de calor recebida pela água ao final de uma hora;

b) o volume de água contido no recipiente.

P. 117 Um chuveiro elétrico possui as seguintes características: 4.400 W — 220 V.

a) Qual a intensidade de corrente elétrica que o atravessa quando ligado a uma rede de 220 V?

b) Ligando-o a uma rede de 110 V e considerando invariável sua resistência elétrica, calcule sua nova potência elétrica e a nova intensidade de corrente elétrica que o percorre.

Entre na rede No endereço eletrônico http://br.geocities.com/saladefisica3/laboratorio/potencia/potencia.htm (acesso em julho/2009), você pode determinar a potência elétrica dissipada por um resistor num circuito elétrico.

Seção 6.4

Resistividade

Objetivos

- Analisar os parâmetros que influenciam na resistência elétrica de um condutor.
- Explicar o que é a resistividade de um material.
- Analisar a variação da resistividade de um material com a temperatura.
- Analisar a variação da resistência elétrica de um resistor com a temperatura.
- Conhecer as diversas unidades de medida de resistividade.

Termos e conceitos

- **coeficiente de temperatura**

Verifica-se que a **resistência elétrica** de um resistor **depende do material** que o constitui, **de suas dimensões** e **de sua temperatura**.

Para simplificar a análise dessas dependências, consideremos que os resistores tenham a forma de um fio cilíndrico (**fig. 6**).

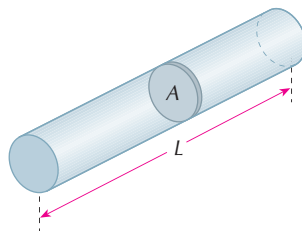



Figura 6. Resistor em forma de fio cilíndrico com área de seção transversal *A* e comprimento *L*.

Consideremos quatro resistores em forma de fio cilíndrico (**fig. 7**), F_1, F_2, F_3 e F_4, e comparemos cada resistor, F_2, F_3 e F_4, com F_1 (de resistência elétrica R). As diferenças são: F_1 e F_2 diferem em seus comprimentos L e $2L$; F_1 e F_3 diferem em suas áreas de seções transversais A e $2A$; e F_1 e F_4 diferem em seus materiais (ferro e cobre).

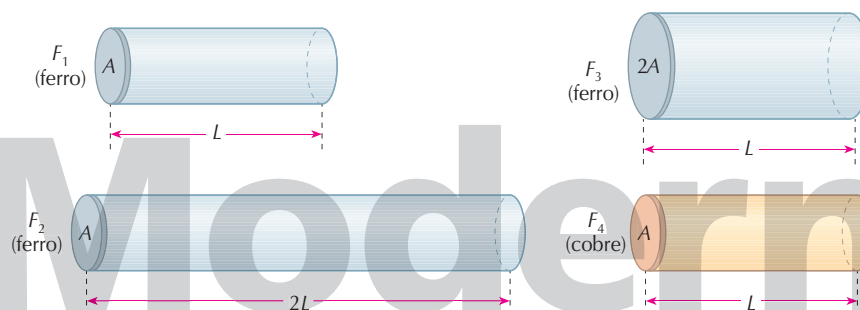



Figura 7. A resistência elétrica de um resistor em forma de fio cilíndrico depende do comprimento, da área da seção transversal, do material e da temperatura.

Realizando experiências com esses fios a temperatura constante, para determinar suas resistências elétricas, obtêm-se os resultados indicados na tabela a seguir.

Material	F_1 (ferro)	F_2 (ferro)	F_3 (ferro)	F_4 (cobre)
Comprimento	L	$2L$	L	L
Área da seção transversal	A	A	$2A$	A
Resistência elétrica	R	$2R$	$\frac{R}{2}$	$R' \neq R$

Analisando a tabela, notamos que:

- fios F_1 e F_2: dois fios de mesmo material (ferro) e mesma área de seção transversal, o que tiver o dobro do comprimento terá o dobro do valor da resistência elétrica. ($L \rightarrow 2L$; $R \rightarrow 2R$)
- fios F_1 e F_3: dois fios de mesmo material (ferro) e mesmo comprimento, o que tiver o dobro da área de seção transversal terá a metade do valor da resistência elétrica. $\left(A \rightarrow 2A;\ R \rightarrow \frac{R}{2}\right)$
- fios F_1 e F_4: fios de mesmo comprimento e mesma área de seção transversal, mas de materiais diferentes (ferro e cobre), apresentam resistências elétricas diferentes.

V3_P1_UN_B_CAP_06.indd 140 19.09.09 09:29:26

Desses resultados concluímos que a resistência elétrica R de um resistor em dada temperatura é:

- diretamente proporcional ao seu comprimento (L);
- inversamente proporcional à sua área de seção transversal (A);
- dependente do material que o constitui.

Essas conclusões podem ser traduzidas pela fórmula:

$$R = \rho \cdot \frac{L}{A}$$

em que ρ (letra grega rô) representa uma grandeza que depende do material que constitui o resistor e da temperatura, sendo denominada **resistividade do material**.

No Sistema Internacional de Unidades, a unidade de resistividade é o **ohm × metro (Ω · m)**.

Para definir essa unidade, considere a expressão $R = \rho \cdot \frac{L}{A}$, da qual implica que $\rho = \frac{RA}{L}$.

Assim, temos: $\rho = 1 \frac{\Omega \cdot m^2}{m} = 1\ \Omega \cdot m$

Na prática usa-se, frequentemente, o ohm × centímetro (Ω · cm) e o $\Omega \cdot mm^2/m$.

A resistividade de um material varia com a temperatura (**fig. 8**). Para variações de temperatura até cerca de 400 °C pode-se admitir como linear a variação da resistividade com a temperatura.

Nessas condições, a resistividade ρ a uma temperatura θ é dada por:

$$\rho = \rho_0 \cdot [1 + \alpha \cdot (\theta - \theta_0)]$$

Nessa fórmula, ρ_0 é a resistividade do material à temperatura θ_0 (20 °C é o valor mais utilizado para θ_0) e α um coeficiente que depende da natureza do material, denominado **coeficiente de temperatura**.

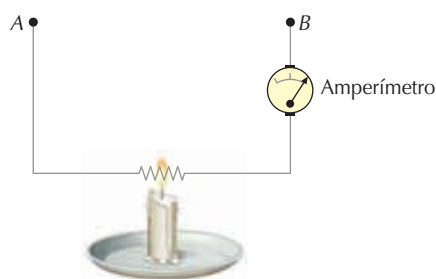
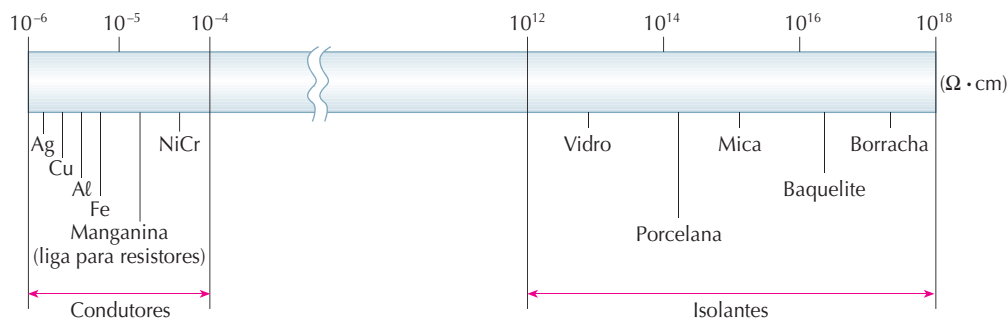



Figura 8. Mantendo uma ddp constante entre A e B, o amperímetro indica uma diminuição na intensidade da corrente elétrica porque o aumento da temperatura é acompanhado de um aumento da resistividade do fio e, portanto, um aumento de sua resistência elétrica.

Conforme o valor da sua resistividade, um material poderá ser considerado condutor ou isolante.

A seguir temos os valores aproximados para as resistividades de diversas substâncias à temperatura ambiente (20 °C):

Para um resistor constituído de um determinado material de resistividade ρ à temperatura θ e ρ_0 à temperatura θ_0, podemos escrever, para suas resistências elétricas, nas temperaturas θ e θ_0, respectivamente, $R = \rho \cdot \frac{L}{A}$ e $R_0 = \rho_0 \cdot \frac{L}{A}$. Observe que não consideramos as variações do comprimento L e da área da seção transversal A com a temperatura, pois elas podem ser desprezadas quando comparadas com a variação da resistividade com a temperatura.

Multiplicando ambos os membros da igualdade $\rho = \rho_0 \cdot [1 + \alpha \cdot (\theta - \theta_0)]$ por $\frac{L}{A}$, temos:

$$\rho \cdot \frac{L}{A} = \rho_0 \cdot \frac{L}{A} \cdot [1 + \alpha \cdot (\theta - \theta_0)] \Rightarrow \boxed{R = R_0 \cdot [1 + \alpha \cdot (\theta - \theta_0)]}$$

Entre na rede No endereço eletrônico http://br.geocities.com/saladefisica3/laboratorio/resistencia/resistencia.htm (acesso em julho/2009), você pode analisar, entre diversos fios, qual deles é o melhor condutor, e observar que a resistência elétrica de um fio metálico aumenta com o aumento da temperatura.

Variação da resistividade com a temperatura

A resistividade dos metais puros aumenta com o aumento da temperatura. Por isso a resistência elétrica de resistores constituídos de metais puros também aumenta com a temperatura. Com o aquecimento, ocorre um aumento do estado de vibração das partículas que constituem o condutor e isso dificulta a passagem da corrente elétrica. Por outro lado, o aquecimento provoca um aumento do número de elétrons livres, responsáveis pela corrente elétrica. Mas, para os metais puros, o primeiro efeito (aumento do estado de vibração das partículas do condutor) predomina sobre o segundo (aumento do número de elétrons livres).

Existem ligas metálicas para as quais os dois efeitos se compensam. Consequentemente, para tais ligas, a resistividade elétrica praticamente não varia com a temperatura. É o caso da **manganina** e do **constantan**, que são ligas de cobre, níquel e manganês utilizadas para a construção de resistores.

Para a grafite o segundo efeito predomina sobre o primeiro e, portanto, sua resistividade diminui com o aumento da temperatura.

Os metais puros possuem coeficientes de temperatura positivos; as citadas ligas especiais possuem coeficientes de temperatura praticamente nulos e o coeficiente de temperatura da grafite é negativo.

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

R. 53 Aplica-se a ddp de 100 V nas extremidades de um fio de 20 m de comprimento e seção circular de área 2 mm². Sabendo-se que a corrente elétrica que circula tem intensidade 10 A, calcule a resistividade do material que constitui o fio em $\Omega \cdot cm$.

Solução:

Pela lei de Ohm, temos:

$$R = \frac{U}{i} \Rightarrow R = \frac{100}{10} \Rightarrow R = 10\ \Omega$$

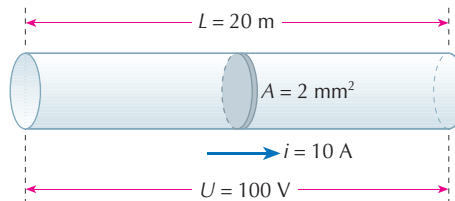
$L = 20$ m
$A = 2$ mm²
$i = 10$ A
$U = 100$ V

Por outro lado:

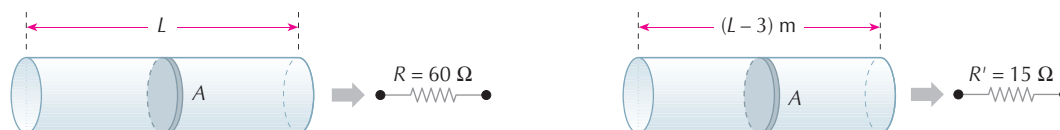
$$R = \rho \cdot \frac{L}{A} \Rightarrow \rho = \frac{RA}{L} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \rho = \frac{10 \cdot 2}{20}\ \frac{\Omega \cdot mm^2}{m} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \rho = 1\ \frac{\Omega \cdot mm^2}{m} \Rightarrow \rho = \frac{1\ \Omega \cdot 10^{-6}\ m^2}{m} \Rightarrow \rho = 10^{-6}\ \Omega \cdot m \Rightarrow \boxed{\rho = 10^{-4}\ \Omega \cdot cm}$$

Resposta: $10^{-4}\ \Omega \cdot cm$

R. 54 A resistência elétrica de um resistor de fio metálico é 60 Ω. Cortando-se um pedaço de 3 m do fio, verifica-se que a resistência do resistor passa a ser 15 Ω. Calcule o comprimento total do fio.

Solução:

(L – 3) m
A
R′ = 15 Ω

Temos: $R = \rho \cdot \frac{L}{A}$ ① e $R' = \rho \cdot \frac{(L - 3)}{A}$ ②

Dividindo ① por ②, temos:

$$\frac{R}{R'} = \frac{L}{L - 3} \Rightarrow \frac{60}{15} = \frac{L}{L - 3} \Rightarrow 60L - 180 = 15L \Rightarrow 45L = 180 \Rightarrow \boxed{L = 4 \text{ m}}$$

Resposta: 4 m

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

P. 118 Um fio de cobre tem comprimento de 120 m e a área de sua seção transversal é de 0,50 mm^2. Sabendo-se que a resistividade do cobre a 0 °C é de $1{,}72 \cdot 10^{-2}\ \Omega \cdot mm^2/m$, determine a resistência elétrica do fio a 0 °C.

P. 119 (Mackenzie-SP) O filamento de tungstênio de uma lâmpada tem resistência de 20 Ω a 20 °C. Sabendo-se que sua seção transversal mede $1{,}102 \cdot 10^{-4}\ mm^2$ e que a resistividade do tungstênio a 20 °C é $5{,}51 \cdot 10^{-2}\ \Omega \cdot mm^2/m$, determine o comprimento do filamento.

P. 120 Um fio condutor de determinado material tem resistência elétrica igual a 30 Ω. Qual será a resistência elétrica de outro fio de mesmo material, com o dobro do comprimento e o triplo da área da seção transversal do primeiro?

P. 121 Um resistor em forma de fio tem resistência elétrica de 100 Ω. Se a ele foi acrescentado um fio idêntico mas com 0,5 m de comprimento, a resistência passa a ser 120 Ω. Determine o comprimento do resistor original.

P. 122 (Unicamp-SP) Sabe-se que a resistência elétrica de um fio cilíndrico é diretamente proporcional ao seu comprimento e inversamente proporcional à área de sua seção transversal.

a) O que acontece com a resistência do fio quando triplicamos o seu comprimento?

b) O que acontece com a resistência do fio quando duplicamos o seu raio?

EXERCÍCIOS PROPOSTOS DE RECAPITULAÇÃO

P. 123 (UFU-MG) A intensidade de corrente é o fator mais relevante nas sensações e consequências do choque elétrico. Estudos cuidadosos desses fenômenos permitiram chegar aos seguintes valores aproximados:

— uma corrente de 1 mA a 10 mA ($1\ mA = 10^{-3}\ A$) provoca apenas uma sensação de "formigamento";

— correntes de 10 mA a 20 mA já causam sensações dolorosas;

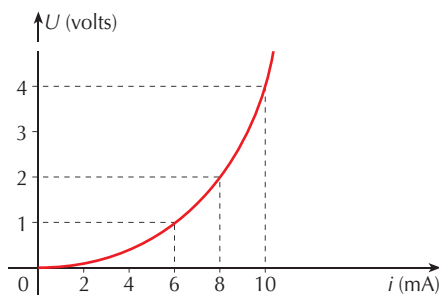
— correntes superiores a 20 mA e inferiores a 100 mA causam, em geral, grandes dificuldades respiratórias;

— correntes superiores a 100 mA são extremamente perigosas, podendo causar a morte da pessoa, por provocar contrações rápidas e irregulares do coração (esse fenômeno é denominado fibrilação cardíaca);

— correntes superiores a 200 mA não causam fibrilação, porém dão origem a graves queimaduras e conduzem à parada cardíaca.

Baseado nas informações acima, responda à situação abaixo.

A resistência elétrica do corpo humano pode variar entre, aproximadamente, 100.000 Ω, para a pele seca, e cerca de 1.000 Ω, para a pele molhada. Assim, se uma pessoa com a pele molhada tocar os dois polos de uma tomada de 120 V, poderá vir a falecer em virtude de fibrilação cardíaca? Justifique.

P. 124 (Fuvest-SP) A curva característica de um elemento resistivo é vista na figura abaixo.

a) Qual a potência dissipada quando i = 10 mA?

b) Qual é a carga que passa em 10 s, quando U = 2,0 volts?

P. 125 (UFPE) Um aquecedor elétrico ligado em 220 V faz a água contida num recipiente ferver em 12 minutos. Quanto tempo, em minutos, será necessário para ferver a mesma quantidade de água se o aquecedor for ligado em 110 V?

P. 126 (Fuvest-SP) A potência de um chuveiro elétrico é 2.200 W. Considere 1 cal = 4 J. Qual a variação de temperatura da água ao passar pelo chuveiro com uma vazão de 0,022 ℓ/s?
(Dados: calor específico da água: 1 cal/g · °C; densidade da água: 1 kg/ℓ.)

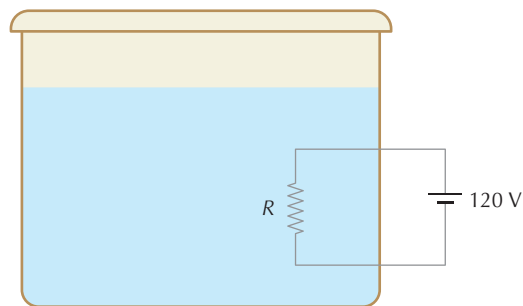
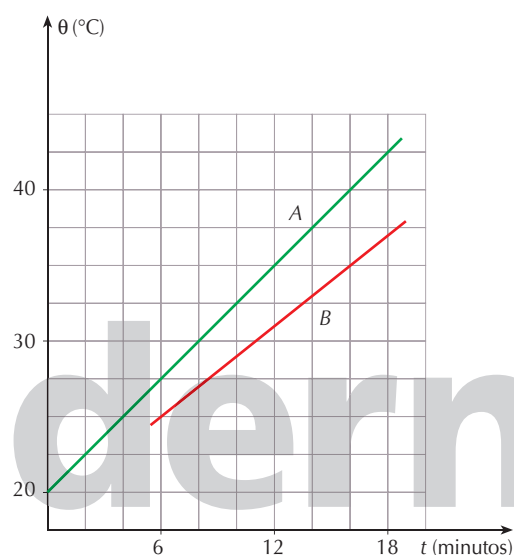
P. 127 (Faap-SP) Congelou-se um grande volume de água em torno de um resistor de resistência elétrica 4 kΩ e fez-se passar por este uma corrente de 2 A, até que 1 kg de gelo se fundiu. Sabendo que o gelo se encontra a 0 °C e que o calor de fusão deste é 80 cal/g, calcule durante quanto tempo o circuito esteve ligado. Considere 1 cal = 4,2 J.

P. 128 (Vunesp) Acende-se uma lâmpada de 100 W, que está imersa num calorímetro transparente contendo 500 g de água. Em 1 min 40 s a temperatura da água sobe 4,5 °C. Que porcentagem de energia elétrica fornecida à lâmpada é convertida em luz? (Considere o calor específico da água, 4,2 J/g · °C, e que a luz produzida não é absorvida pelo calorímetro. Despreze a capacidade térmica do calorímetro e da lâmpada.)

P. 129 (Fuvest-SP) Um chuveiro elétrico de 220 V dissipa uma potência de 2,2 kW.

a) Qual o custo de um banho com 10 min de duração se a tarifa é de R$ 0,20 por kWh?

b) Desejando-se duplicar a variação de temperatura da água mantendo-se constante a sua vazão, qual deve ser a nova resistência do chuveiro?

P. 130 (Fuvest-SP) Uma experiência é realizada para estimar o calor específico de um bloco de material desconhecido, de massa m_b = 5,4 kg. Em um recipiente de isopor, uma quantidade de água é aquecida por uma resistência elétrica R = 40 Ω, ligada a uma fonte de 120 V, conforme a figura a seguir.

Nessas condições, e com os devidos cuidados experimentais, é medida a variação da temperatura θ da água, em função do tempo *t*, obtendo-se a reta *A* do gráfico. A seguir, repete-se a experiência desde o início, desta vez colocando-se o bloco imerso dentro d'água, obtendo-se a reta *B* do gráfico.

a) Estime a massa M, em kg, da água colocada no recipiente.

b) Estime o calor específico c_b do bloco, explicitando claramente as unidades utilizadas.

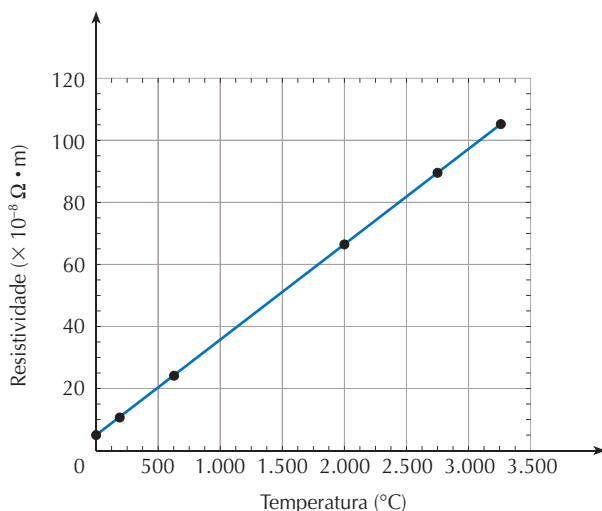
(Dados: calor específico da água = 1,0 cal/g · °C, 1 cal ≃ 4 J)

P. 131 (Efoa-MG) Dois pedaços de fios de cobre cilíndricos têm o mesmo comprimento. Um tem diâmetro 2 mm e resistência elétrica R_2, o outro tem diâmetro 3 mm e resistência elétrica R_3.

a) Qual o valor da razão $\frac{R_2}{R_3}$?

b) Nas instalações elétricas os fios mais grossos são utilizados para circuitos percorridos por correntes elétricas de maior intensidade. Qual a justificativa, sob o ponto de vista da segurança dessas instalações, desse procedimento?

P. 132 (Unicamp-SP) A invenção da lâmpada incandescente no final do século XIX representou uma evolução significativa na qualidade de vida das pessoas. As lâmpadas incandescentes atuais consistem de um filamento muito fino de tungstênio dentro de um bulbo de vidro preenchido por um gás nobre.

O filamento é aquecido pela passagem de corrente elétrica, e o gráfico a seguir apresenta a resistividade do filamento como função de sua temperatura. A relação entre a resistência e a resistividade é dada por $R = \rho \cdot \frac{L}{A}$, onde R é a resistência do filamento, L seu comprimento, A a área de sua seção reta e ρ sua resistividade.

a) Caso o filamento seja aquecido desde a temperatura ambiente até 2.000 °C, sua resistência aumentará ou diminuirá? Qual a razão, $\frac{R_{2.000}}{R_{20}}$, entre as resistências do filamento a 2.000 °C e a 20 °C? Despreze efeitos de dilatação térmica.

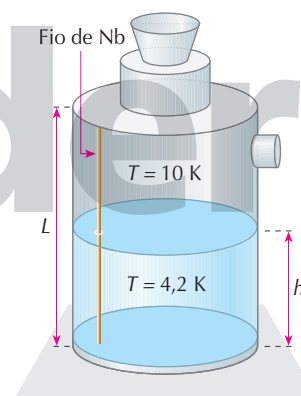
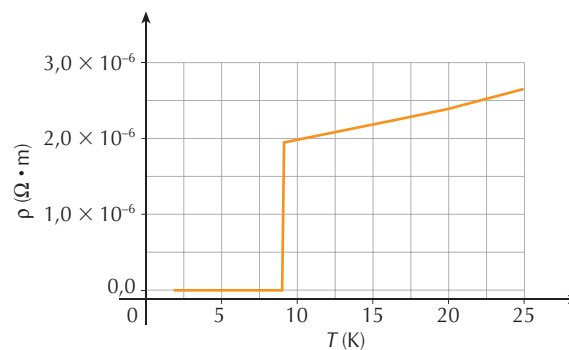
b) Qual a resistência que uma lâmpada acesa (potência efetiva de 60 W) apresenta quando alimentada por uma tensão efetiva de 120 V?

c) Qual a temperatura do filamento no item anterior, se ele apresenta um comprimento de 50 cm e um diâmetro de 0,05 mm? Use a aproximação $\pi = 3$.

P. 133 (UnB-DF) O chuveiro elétrico é um dos principais inimigos da economia doméstica. O uso indiscriminado desse equipamento pode gerar altas contas de energia elétrica no final de cada mês. Para tentar minimizar esse problema, um pai de família, depois de instalar um chuveiro de 6.250 W em 220 V, resolveu explicar a seu filho adolescente como o chuveiro funciona:

"Este chuveiro possui três posições de operação: **desligado**, **verão** e **inverno**. Quando a chave está na primeira posição, a resistência elétrica do chuveiro é infinita, ou seja, não há corrente elétrica e, por isso, a água não é aquecida. Quando a chave está na posição **inverno**, a resistência é mínima, o que garante máxima corrente elétrica e máximo aquecimento da água. Se a chave está na posição **verão**, a resistência é igual ao triplo da resistência mínima. Atualmente, um banho de uma hora de duração, com a chave na posição **inverno**, custa R$ 1,00. Portanto, se em nossa casa moram sete pessoas, temos de ter cuidado com a duração de cada banho e, sempre que possível, usar o chuveiro com a chave na posição **verão**. Além do mais, o preço do kWh aqui em Brasília depende da faixa de consumo; quanto mais se consome mais caro fica o kWh".

Considerando que o preço do kWh independe da energia consumida e que cada um dos sete moradores toma um banho de vinte minutos de duração por dia, usando o chuveiro com a chave na posição **verão**, calcule, **em reais**, o valor a ser pago pelo uso do chuveiro em um período de trinta dias. Despreze a parte fracionária de seu resultado, caso exista.

P. 134 (Unicamp-SP) O gráfico abaixo mostra a resistividade elétrica de um fio de nióbio (Nb) em função da temperatura.

No gráfico, pode-se observar que a resistividade apresenta uma queda brusca em $T = 9{,}0$ K, tornando-se nula abaixo dessa temperatura. Esse comportamento é característico de um material supercondutor. Um fio de Nb de comprimento total $L = 1{,}5$ m e seção transversal de área $A = 0{,}050$ mm^2 é esticado verticalmente do topo até o fundo de um tanque de hélio líquido, a fim de ser usado como medidor de nível, conforme ilustrado na figura anterior. Sabendo-se que o hélio líquido se encontra a 4,2 K e que a temperatura da parte não imersa do fio fica em torno de 10 K, pode-se determinar a altura h do nível de hélio líquido através da medida da resistência do fio.

a) Calcule a resistência do fio quando toda a sua extensão está a 10 K, isto é, quando o tanque está vazio.

b) Qual é a altura h do nível de hélio líquido no interior do tanque em uma situação em que a resistência do fio de Nb vale 36 Ω?

TESTES PROPOSTOS

T. 121 (ITA-SP) Medidas de intensidade de corrente e ddps foram realizadas com dois condutores de metais diferentes e mantidos à mesma temperatura, encontrando-se os resultados da tabela abaixo:

Condutor 1		Condutor 2	
i (A)	*U* (V)	*i* (A)	*U* (V)
0	0	0	0
0,5	2,18	0,5	3,18
1,0	4,36	1,0	4,36
2,0	8,72	2,0	6,72
4,0	17,44	4,0	11,44

Nessas condições pode-se afirmar que:

a) ambos os condutores obedecem à lei de Ohm.
b) nenhum dos condutores obedece à lei de Ohm.
c) somente o condutor 1 obedece à lei de Ohm.
d) somente o condutor 2 obedece à lei de Ohm.
e) nenhuma das anteriores.

T. 122 (Cesgranrio-RJ) Alguns elementos passivos de um circuito elétrico são denominados resistores ôhmicos por obedecerem à lei de Ohm. Tal lei afirma que:

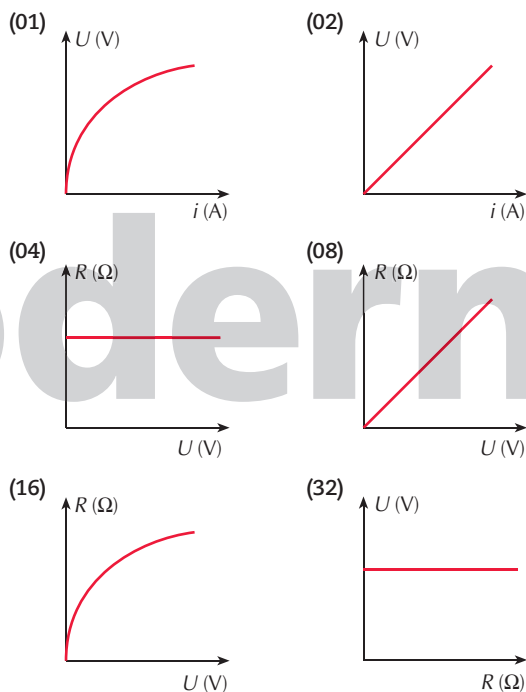
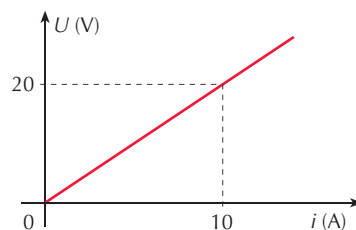
a) mantida constante a temperatura do resistor, sua resistência elétrica é constante, independente da tensão aplicada.
b) a resistência elétrica do resistor é igual à razão entre a tensão que lhe é aplicada e a corrente que o atravessa.
c) a potência dissipada pelo resistor é igual ao produto da tensão que lhe é aplicada pela corrente que o atravessa.
d) o gráfico tensão *versus* corrente para o resistor é uma linha reta que passa pela origem, independente de sua temperatura ser ou não mantida constante.
e) a resistência elétrica do resistor aumenta com o aumento de sua temperatura e diminui com a diminuição de sua temperatura.

T. 123 (UFC-CE) Um pássaro pousa em um dos fios de uma linha de transmissão de energia elétrica. O fio conduz uma corrente elétrica $i = 1.000$ A e sua resistência, por unidade de comprimento, é de $5,0 \cdot 10^{-5}$ Ω/m. A distância que separa os pés do pássaro, ao longo do fio, é de 6,0 cm. A diferença de potencial, em milivolts (mV), entre os seus pés é:

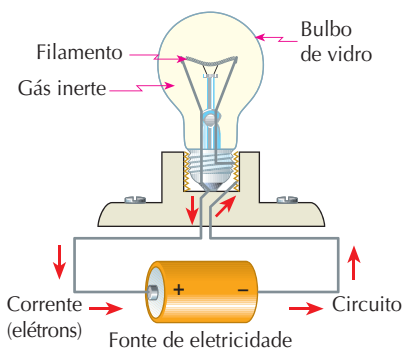
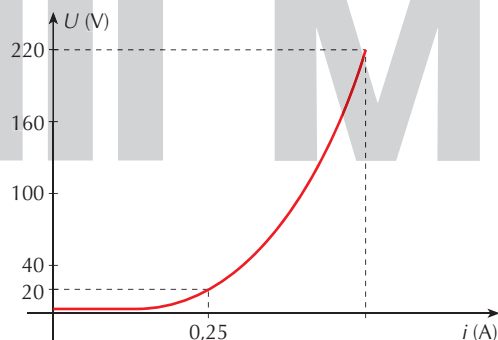
a) 1,0
b) 2,0
c) 3,0
d) 4,0
e) 5,0

T. 124 (Uepa) Os choques elétricos produzidos no corpo humano podem provocar efeitos que vão desde uma simples dor ou contração muscular até paralisia respiratória ou fibrilação ventricular. Tais efeitos dependem de fatores como a intensidade da corrente elétrica, duração, resistência da porção do corpo envolvida. Suponha, por exemplo, um choque produzido por uma corrente de apenas 4 mA e que a resistência da porção do corpo envolvida seja de 3.000 Ω. Então podemos afirmar que o choque elétrico pode ter ocorrido devido ao contato com:

a) uma pilha grande de 1,5 V.
b) os contatos de uma lanterna contendo uma pilha grande de 6,0 V.
c) os contatos de uma bateria de automóvel de 12 V.
d) uma descarga elétrica produzida por um raio num dia de chuva.
e) os contatos de uma tomada de rede elétrica de 120 V.

T. 125 (UFSC) Dos gráficos mostrados abaixo escolha aqueles que melhor representam um resistor linear (que obedece à lei de Ohm). Dê como resposta a soma dos números correspondentes aos gráficos escolhidos.

T. 126 (Unip-SP) O gráfico representa a tensão elétrica (diferença de potencial) em função da intensidade de corrente elétrica em um resistor.

Se o resistor for submetido a uma tensão elétrica de 4,0 V, a sua potência elétrica será de:

a) 200 W
b) 8,0 W
c) 2,0 W
d) 4,0 W
e) 40 W

T. 127 (UEPB) A lâmpada elétrica incandescente foi inventada por volta de 1870 e envolveu o trabalho de muitos pesquisadores e inventores. Entre estes destaca-se Thomas Edison.
As lâmpadas incandescentes atuais utilizam um fio de tungstênio encerrado num bulbo de vidro (conforme a figura a seguir).

Esse fio tem diâmetro inferior a 0,1 mm e é enrolado conforme uma hélice cilíndrica. Passando corrente elétrica no filamento, ele se aquece a uma temperatura da ordem de 3.000 °C. O filamento torna-se, então, incandescente e começa a emitir luz. No interior da lâmpada não pode haver ar, pois, do contrário, o filamento se oxida e incendeia-se.
O gráfico a seguir mostra a curva volt-ampère de uma lâmpada incandescente comum. A lâmpada dissipa 110 W de potência quando opera sob tensão nominal de 220 V.

Com base no gráfico e nas características da lâmpada, analise as proposições a seguir, escrevendo V ou F conforme sejam verdadeiras ou falsas, respectivamente:

( ) A resistência elétrica do filamento, no intervalo de tensão mostrado pelo gráfico, é constante e igual a 80 Ω.
( ) A potência dissipada pela lâmpada, quando submetida a uma tensão de 20 V, é de 5 W.
( ) A resistência elétrica do filamento, quando a lâmpada opera na tensão de 220 V, é cinco vezes maior do que quando ela está submetida à tensão de apenas 20 V.
( ) A corrente elétrica na lâmpada, quando ela está submetida à tensão de 220 V, é de 0,5 A.
( ) A luz emitida por uma lâmpada incandescente não é efeito direto da corrente elétrica e sim consequência do aquecimento no filamento produzido pela passagem da corrente.

Assinale a alternativa que corresponde à sequência correta:
a) V, V, F, V, F
b) F, V, F, V, V
c) V, V, F, F, F
d) F, V, V, F, F
e) V, F, V, V, V

T. 128 (Olimpíada Paulista de Física) Um resistor ôhmico de resistência elétrica R, submetido a uma diferença de potencial U, é percorrido por uma corrente i e dissipa P watts. A corrente elétrica e a potência dissipada de um outro resistor $3R$ submetido a uma diferença de potencial $3U$ são, respectivamente:
a) $2i$ e $9P$
b) i e $9P$
c) $\frac{i}{2}$ e $9P$
d) $2i$ e $3P$
e) i e $3P$

T. 129 (UFMG) Considerando uma lâmpada incandescente, de 60 W — 120 V, todas as afirmativas estão corretas, exceto:
a) A lâmpada converte em 1,0 h cerca de $2{,}2 \cdot 10^5$ joules de energia elétrica em luz e calor.
b) A resistência da lâmpada acesa vale $2{,}4 \cdot 10^2$ Ω.
c) A potência elétrica dissipada pela lâmpada, sob uma tensão de 90 volts, é menor do que 60 watts.
d) A resistência da lâmpada é a mesma, quer esteja acesa, quer esteja apagada.
e) A intensidade da corrente, na lâmpada acesa, é de 0,50 A.

T. 130 (PUC-MG) Um condutor de resistência igual a 20 ohms, submetido a uma ddp de 10 volts, em 2,0 min, dissipa uma energia, em joules, de:
a) $3{,}0 \cdot 10^2$
b) $6{,}0 \cdot 10^2$
c) $10 \cdot 10^2$
d) $12 \cdot 10^2$
e) $40 \cdot 10^2$

T. 131 (UEFS-BA) Uma lâmpada sob ddp de 110 V é atravessada por uma corrente de 500 mA. Se essa lâmpada fica acesa por 8 horas, a energia elétrica consumida por ela, em W · h, é igual a:
a) 44
b) 88
c) 220
d) 440
e) 880

T. 132 Em um chuveiro elétrico (2.200 W — 220 V) cortou-se a resistência ao meio; em virtude desse corte, a nova potência do chuveiro será:
a) 550 W
b) 1.100 W
c) 4.400 W
d) a mesma de antes
e) nenhuma das anteriores

T. 133 (Unisinos-RS) Um estudante resolveu acampar durante as férias de verão. Em sua bagagem levou uma lâmpada com as especificações:
220 V — 60 W. No *camping* escolhido, a rede elétrica é de 110 V. Se o estudante utilizar a sua lâmpada na voltagem do *camping*:
a) não terá luz, pois a lâmpada "queimará".
b) ela brilhará menos, porque a potência dissipada será de 15 W.
c) ela brilhará menos, porque a potência dissipada será de 30 W.
d) ela brilhará normalmente, dissipando a potência de 60 W.
e) ela brilhará mais, porque dissipará uma potência de 120 W.

T. 134 (UFPel-RS) Um estudante que morava em Pelotas, onde a tensão é 220 V, após concluir seu curso de graduação, mudou-se para Porto Alegre, onde a tensão é 110 V. Modificações deverão ser feitas na resistência do chuveiro — que ele levou na mudança — para que a potência desse aparelho não se altere.

Com relação à nova resistência do chuveiro e à corrente elétrica que passará através dessa resistência, é correto afirmar que:

a) tanto a resistência original quanto a corrente elétrica quadruplicarão.
b) a resistência original será reduzida à metade e a corrente elétrica duplicará.
c) tanto a resistência original como a corrente elétrica duplicarão.
d) a corrente elétrica permanecerá a mesma, não sendo, pois, necessário modificar a resistência original.
e) a resistência original será reduzida à quarta parte e a corrente elétrica duplicará.

T. 135 (UFV-MG) Dois chuveiros elétricos, um de 110 V e outro de 220 V, de mesma potência, adequadamente ligados, funcionam durante o mesmo tempo. Então, é correto afirmar que:

a) o chuveiro ligado em 110 V consome mais energia.
b) ambos consomem a mesma energia.
c) a corrente é a mesma nos dois chuveiros.
d) as resistências dos chuveiros são iguais.
e) no chuveiro ligado em 220 V a corrente é maior.

T. 136 A chave de ligação de um chuveiro pode ser colocada em três posições: fria, morna, quente. A resistência elétrica que aquece a água varia com essas posições, assumindo, *não* respectivamente, os valores média, baixa, alta. A correspondência certa é:

a) água quente, resistência baixa.
b) água fria, resistência baixa.
c) água quente, resistência média.
d) água morna, resistência alta.
e) nenhuma das correspondências anteriores é correta.

T. 137 (Fatec-SP) Em um apartamento, há um chuveiro elétrico que dissipa 6.000 W de potência, quando usado com o seletor de temperatura na posição inverno, e 4.000 W, quando usado com o seletor de temperatura na posição verão.

O casal que reside nesse apartamento utiliza o chuveiro em média 30 minutos por dia, sempre com o seletor na posição inverno. Assustado com o alto valor da conta de luz, o marido informa a sua esposa que, a partir do dia seguinte, o chuveiro passará a ser utilizado apenas com o seletor na posição verão.

Com esse procedimento, num mês de 30 dias, a economia de energia elétrica, em quilowatts-hora, será de:

a) 10
b) 30
c) 100
d) 8.000
e) 60.000

T. 138 (Unip-SP) Considere um resistor para chuveiro elétrico e uma lâmpada elétrica com os seguintes dados nominais: resistor: 220 V — 2.200 W; lâmpada: 110 V — 110 W. Verifique qual a opção correta, supondo que o resistor e a lâmpada estão ligados na tensão correta.

a) O resistor e a lâmpada têm resistências elétricas iguais.
b) O resistor e a lâmpada são percorridos por correntes elétricas de mesma intensidade.
c) A lâmpada e o resistor consomem a mesma energia elétrica para o mesmo tempo de utilização.
d) A corrente elétrica na lâmpada é dez vezes mais intensa do que no resistor.
e) O resistor consome energia elétrica vinte vezes maior que a da lâmpada, para o mesmo tempo de utilização.

T. 139 (Fuvest-SP) Usando todo o calor produzido pela combustão direta de gasolina, é possível, com 1,0 litro de tal produto, aquecer 200 litros de água de 10 °C a 45 °C. Esse mesmo aquecimento pode ser obtido por um gerador de eletricidade, que consome 1,0 litro de gasolina por hora e fornece 110 V a um resistor de 11 Ω, imerso na água, durante um certo intervalo de tempo. Todo o calor liberado pelo resistor é transferido à água. Nessas condições, o aquecimento da água obtido através do gerador, quando comparado ao obtido diretamente a partir da combustão, consome uma quantidade de gasolina, aproximadamente:

a) 7 vezes menor
b) 4 vezes menor
c) igual
d) 4 vezes maior
e) 7 vezes maior

(Dados: densidade da água = 1,0 kg/ℓ; calor específico da água = 1,0 cal/g · °C; 1 cal = 4 J)

T. 140 (PUC-RS) Um condutor elétrico tem comprimento L, diâmetro d e resistência elétrica R. Se duplicarmos seu comprimento e diâmetro, sua nova resistência elétrica passará a ser:

a) R
b) $2R$
c) $\frac{R}{2}$
d) $4R$
e) $\frac{R}{4}$

T. 141 Têm-se cinco fios condutores F_1, F_2, F_3, F_4 e F_5, de mesmo material e à mesma temperatura. Os fios apresentam comprimento e área de seção transversal dados pela tabela:

	Comprimento	Área de seção transversal
F_1	L	A
F_2	$2L$	A
F_3	L	$2A$
F_4	L	$\frac{A}{2}$
F_5	$2L$	$\frac{A}{2}$

Sendo R a resistência elétrica de F_1, podemos afirmar que F_2, F_3, F_4 e F_5 têm resistências elétricas, respectivamente:

a) 2R; 2R; $\frac{R}{2}$; R

b) 2R; $\frac{R}{2}$; 2R; 4R

c) 2R; $\frac{R}{2}$; 2R; R

d) $\frac{R}{2}$; 2R; 2R; R

e) R; 2R; $\frac{R}{2}$; 4R

T. 142 (Olimpíada Paulista de Física) Um fio de chumbo tem resistividade que é oito vezes maior que aquela do alumínio. O fio de chumbo tem um comprimento de 1,0 m e raio de 0,01 m. O fio de alumínio tem comprimento de 3,0 m e raio de 2,0 cm. Qual é a razão entre a resistência do fio de chumbo e a do fio de alumínio?

a) $\frac{1}{3}$

b) $\frac{32}{3}$

c) $\frac{4}{3}$

d) $\frac{8}{3}$

e) nenhuma das anteriores

T. 143 (Unifor-CE) Um fio metálico, de comprimento L e resistência elétrica R, é estirado de forma que seu novo comprimento passa a ser $2L$. Considere que a densidade e a resistividade do material permaneçam invariáveis. À mesma temperatura, sua nova resistência elétrica será:

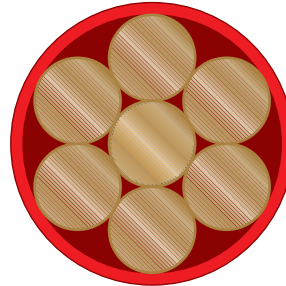
a) 4R

b) 2R

c) R

d) $\frac{R}{2}$

e) $\frac{R}{4}$

T. 144 (Mackenzie-SP) Para a transmissão de energia elétrica, constrói-se um cabo composto por 7 fios de uma liga de cobre de área de secção transversal 10 mm^2 cada um, como mostra a figura.

A resistência elétrica desse cabo, a cada quilômetro, é:

a) 2,1 Ω

b) 1,8 Ω

c) 1,2 Ω

d) 0,6 Ω

e) 0,3 Ω

Dado: resistividade da liga de cobre $= 2{,}1 \cdot 10^{-2}\ \Omega \cdot mm^2/m$

T. 145 (UEL-PR) O físico alemão Georg Simon Ohm (1787-1854) constatou que a intensidade da corrente elétrica i que percorre um fio condutor é diretamente proporcional à ddp U que a ocasionou, ou seja, $U = R \cdot i$, onde esta constante de proporcionalidade R é chamada resistência elétrica do condutor. Entretanto, para vários condutores, a resistência varia com a temperatura, como em uma lâmpada de filamento, ou em um gás ionizado. Esses condutores são ditos não lineares ou não ôhmicos. Embora a razão entre a ddp e a intensidade da corrente não seja constante para os condutores não lineares, usa-se, assim mesmo, o termo resistência para essa razão. Para esses materiais, a variação da resistência com a temperatura, dentro de uma larga faixa de temperaturas, é dada por $R = R_0 \cdot [1 + \alpha (T - T_0)]$, onde R é a resistência à temperatura T, R_0 a resistência à temperatura T_0, e α o coeficiente de variação térmica da resistência.

Uma lâmpada de filamento é constituída de um bulbo de vidro, no interior do qual existe vácuo ou gás inerte, e de um fio fino, quase sempre de tungstênio, que se aquece ao ser percorrido por uma corrente elétrica. A lâmpada de uma lanterna alimentada por uma bateria de 3 V tem um filamento de tungstênio ($\alpha = 4{,}5 \times 10^{-3}\ °C^{-1}$), cuja resistência à temperatura ambiente (20 °C) é de 1,0 Ω.

Se, quando acesa, a corrente for de 0,3 A, a temperatura do filamento será:

a) 1.500 °C

b) 2.020 °C

c) 2.293 °C

d) 5.400 °C

e) 6.465 °C

UNIDADE B

Capítulo 7

Associação de resistores

Os resistores podem ser associados basicamente de dois modos distintos: em série e em paralelo. Ambos os modos de associação podem estar presentes: temos uma associação mista.

7.1 Resistor equivalente. Associação de resistores em série

Resistores associados em série são percorridos pela mesma corrente elétrica. Em chuveiros elétricos, por exemplo, associações desse tipo são utilizadas no controle da temperatura da água.

7.2 Associação de resistores em paralelo

Resistores associados em paralelo ficam submetidos à mesma diferença de potencial (ddp). As lâmpadas de uma residência, por exemplo, são ligadas em paralelo.

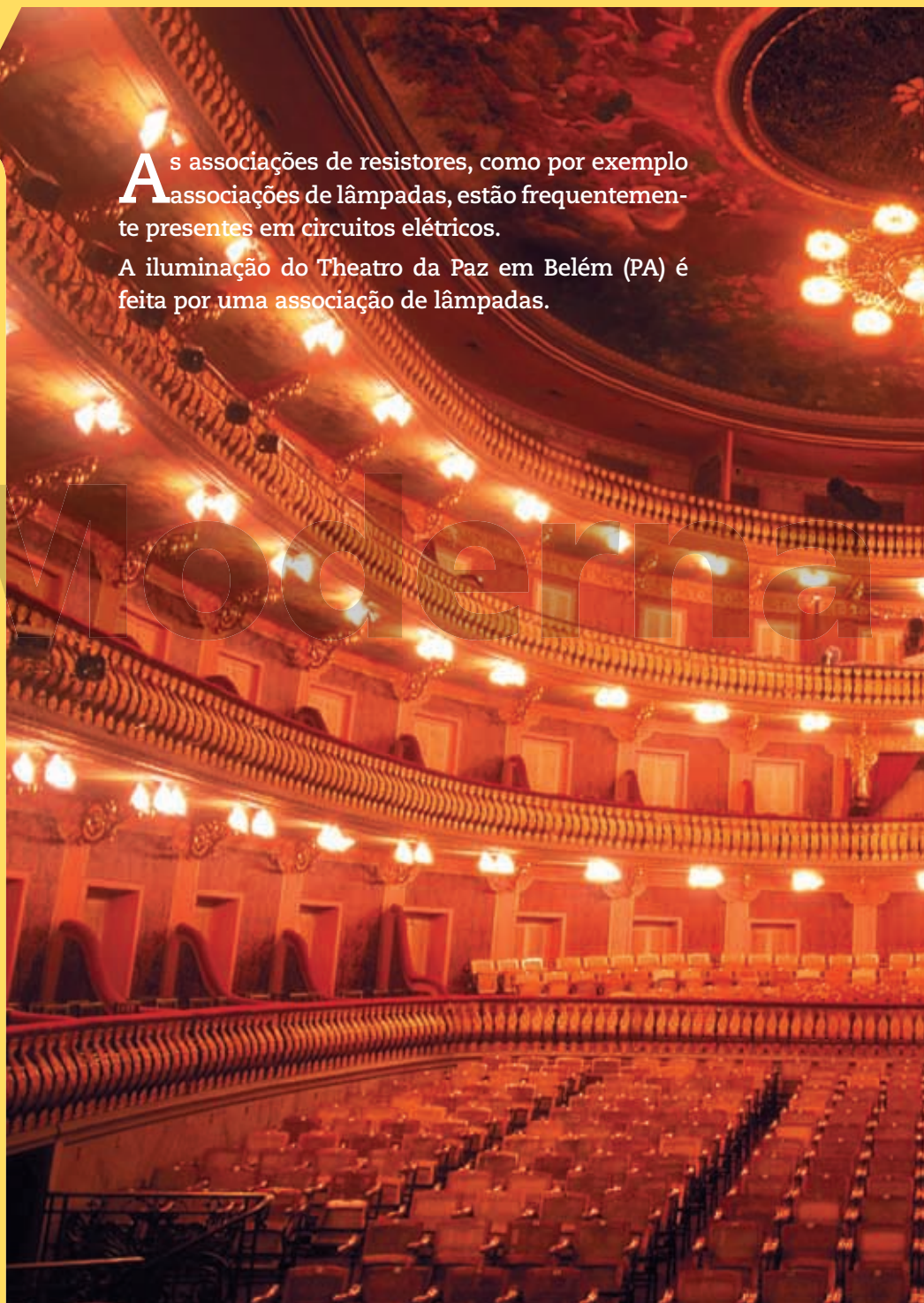
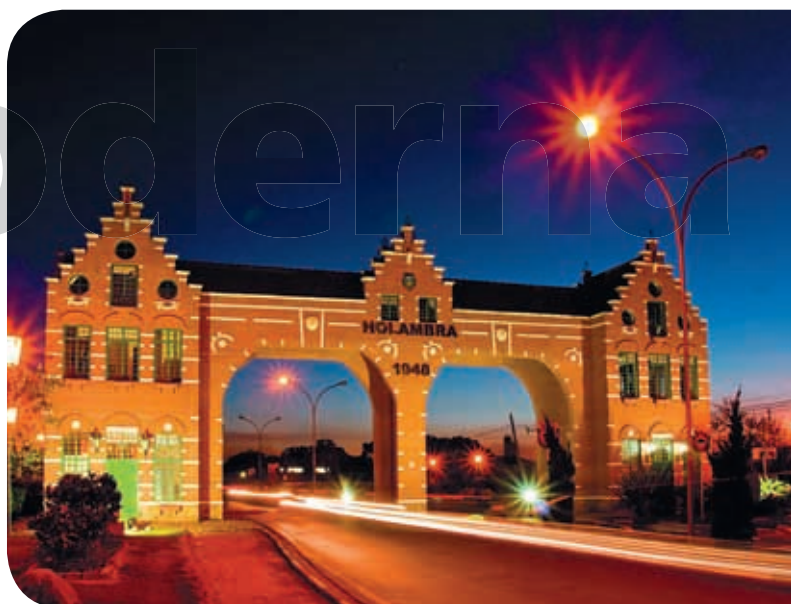
7.3 Associação mista de resistores

As associações mistas de resistores são aquelas constituídas por associações em série e em paralelo. Lâmpadas usadas como decoração de Natal, por exemplo, podem ser associadas dessa maneira.

7.4 Curto-circuito

Quando dois pontos de um circuito são conectados por um condutor de resistência desprezível, forma-se um curto-circuito entre esses pontos.

As associações de resistores, como por exemplo associações de lâmpadas, estão frequentemente presentes em circuitos elétricos.

A iluminação do Theatro da Paz em Belém (PA) é feita por uma associação de lâmpadas.

A ponte Hercílio Luz, em Florianópolis (SC), e o portal de Holambra (SP) também são iluminados por associações de lâmpadas.

Seção 7.1

Resistor equivalente. Associação de resistores em série

Objetivos

- Analisar a associação de resistores em série.
- Compreender como obter a resistência do resistor equivalente em uma associação em série.
- Compreender o que é reostato e como funciona.
- Analisar situações na qual o efeito Joule é desejável: fios, fusíveis e lâmpadas incandescentes.

Termos e conceitos

- resistor equivalente
- potência dissipada
- disjuntor
- ddp nominal
- potência nominal de uma lâmpada

Ao montar um circuito, é comum o operador necessitar de um valor de resistência diferente dos valores fornecidos pelos resistores de que dispõe. Outras vezes, a corrente elétrica que vai atravessar o resistor é superior à que ele pode suportar sem ser danificado. Nessas situações, a solução é utilizar uma **associação de resistores**.

Os resistores podem ser associados basicamente de dois modos distintos: **em série** e **em paralelo**. É possível ainda que ambos os modos de associar estejam presentes; teremos então uma **associação mista**.

Qualquer que seja o tipo de associação, denominamos **resistor equivalente** aquele que funciona no circuito do mesmo modo que a associação, podendo substituí-la. Então, a **resistência da associação** é igual à **resistência do resistor equivalente**.

1 Associação de resistores em série

Na associação em série, os resistores são ligados um em seguida ao outro, de modo a serem percorridos pela mesma corrente elétrica. Na **figura 1**, representamos três resistores de resistências elétricas R_1, R_2 e R_3, associados em série, e o correspondente resistor equivalente, cuja resistência R_s é a resistência da associação. A corrente comum que os atravessa tem intensidade i.

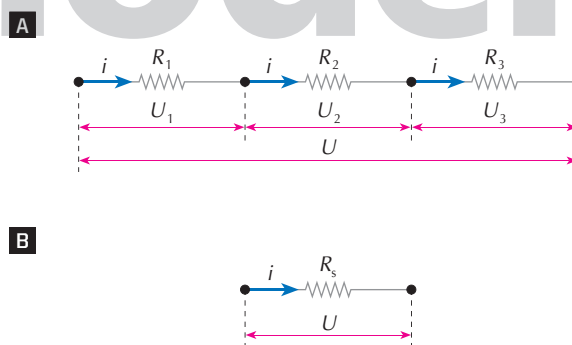



Figura 1. (A) Três resistores associados em série. (B) O resistor equivalente.

A potência dissipada em um resistor é dada por $Pot = R \cdot i^2$. Para os três resistores associados em série, teremos:

$$Pot_1 = R_1 \cdot i^2$$

$$Pot_2 = R_2 \cdot i^2$$

$$Pot_3 = R_3 \cdot i^2$$

> Em uma associação de resistores em série, a potência dissipada em cada resistor é diretamente proporcional à sua resistência elétrica.

Considerando a definição de resistor equivalente, tudo se passa como se houvesse um único resistor de resistência R_s dissipando a potência $Pot = R_s \cdot i^2$. Essa potência corresponde à soma das potências dissipadas individualmente pelos resistores associados:

$$Pot = Pot_1 + Pot_2 + Pot_3 \Rightarrow$$
$$\Rightarrow R_s \cdot i^2 = R_1 \cdot i^2 + R_2 \cdot i^2 + R_3 \cdot i^2 \Rightarrow \boxed{R_s = R_1 + R_2 + R_3}$$

Em uma associação de resistores em série, a resistência do resistor equivalente é igual à soma das resistências dos resistores associados.

Aplicando a lei de Ohm em cada resistor da **figura 1**, vem:

$$U_1 = R_1 \cdot i$$
$$U_2 = R_2 \cdot i$$
$$U_3 = R_3 \cdot i$$

Em uma associação de resistores em série, a ddp em cada resistor é diretamente proporcional à sua resistência elétrica.

Aplicando a lei de Ohm ao resistor equivalente, temos: $\boldsymbol{U = R_s \cdot i}$

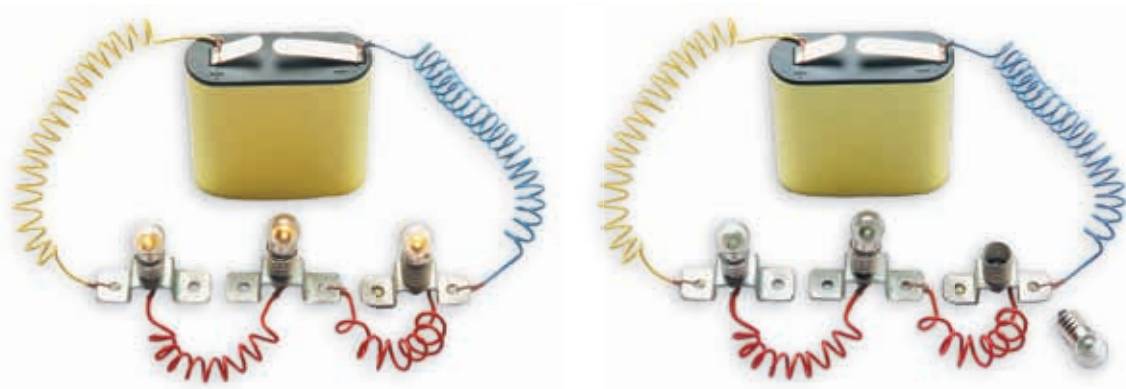
Multiplicando pela intensidade de corrente i ambos os membros da igualdade $R_s = R_1 + R_2 + R_3$, vem:

$$R_s \cdot i = R_1 \cdot i + R_2 \cdot i + R_3 \cdot i \Rightarrow \boxed{U = U_1 + U_2 + U_3}$$

A ddp de uma associação em série é igual à soma das ddps nos resistores associados.

Observação

No caso particular de uma associação em série de n resistores iguais, $R_1 = R_2 = R_3 = ... = R_n$, de resistência elétrica R cada um, temos:

$$\boxed{R_s = nR}$$

As três lâmpadas estão associadas em série, sendo atravessadas pela mesma corrente elétrica; quando uma é removida, interrompe-se a passagem da corrente e as outras se apagam.

2 Reostatos

Denominam-se **reostatos** os resistores cuja resistência elétrica pode ser ajustada.

O **reostato de cursor** (**fig. 2A**) é um resistor constituído por um fio metálico enrolado em um suporte isolante. Mudando-se a posição do cursor C, varia-se o comprimento do fio atravessado pela corrente. Assim, a resistência elétrica do reostato pode assumir grande número de valores entre zero e o valor total da resistência do fio metálico. Na **figura 2B**, mostra-se o modo usual de representar o reostato de cursor: no caso, sendo R a resistência total do fio, o cursor posicionado no ponto médio indica que a resistência elétrica incluída no circuito é apenas a metade, isto é, $\frac{R}{2}$. O símbolo de reostato mostrado na **figura 2C** também aparece com frequência na representação dos circuitos.

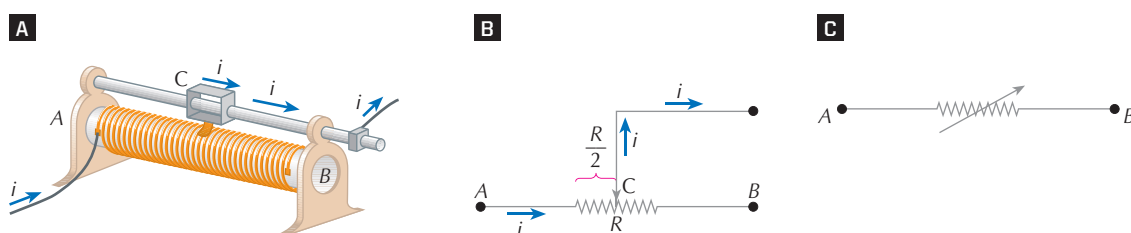



Figura 2. (A) Reostato de cursor. (B) Representação usual do reostato de cursor. (C) Símbolo de reostato.

Outro tipo de reostato é o **reostato de pontos** (**fig. 3**). Trata-se de uma associação de resistores em série com pontos intermediários nos quais pode ser feita a ligação ao circuito. A diferença essencial entre esse aparelho e o reostato de cursor é que naquele a variação da resistência pode ser feita de modo contínuo, isto é, ele pode ter qualquer valor de resistência entre zero e o valor total R. Já no reostato de pontos, só alguns valores de resistência são possíveis entre zero e o valor máximo. Na **figura 3**, com a chave na posição 4, a resistência elétrica introduzida no circuito vale $1\Omega + 2\Omega = 3\Omega$.

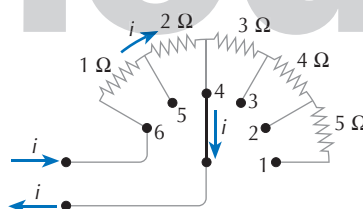



Figura 3. Reostato de pontos.

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

R. 55 Um resistor de 5 Ω e um resistor de 20 Ω são associados em série e à associação aplica-se uma ddp de 100 V.

a) Qual a resistência equivalente da associação?

b) Qual a intensidade de corrente elétrica na associação?

c) Qual a ddp em cada resistor associado?

$R_1 = 5\ \Omega$ — $R_2 = 20\ \Omega$ — i — $U = 100$ V

Solução:

A sequência para a solução do exercício está esquematizada nas figuras ao lado.

a) A resistência equivalente é (**fig. I**):

$$R_s = R_1 + R_2 \Rightarrow R_s = 5 + 20 \Rightarrow \boxed{R_s = 25\ \Omega}$$

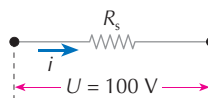
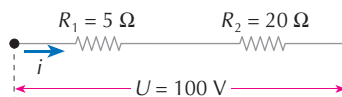



Figura I.

b) Pela lei de Ohm (**fig. II**), temos:

$$i = \frac{U}{R_s} \Rightarrow i = \frac{100}{25} \Rightarrow \boxed{i = 4\text{ A}}$$

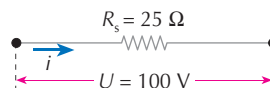
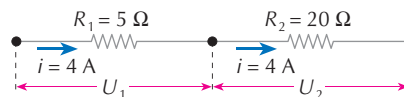
Figura II.

c) A ddp em cada resistor é (**fig. III**):

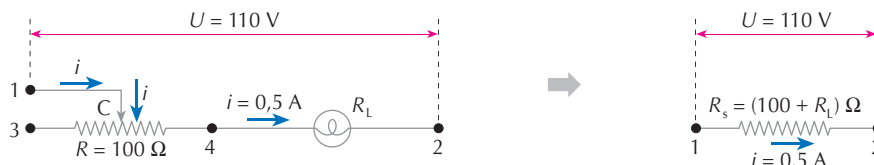
$$U_1 = R_1 \cdot i \Rightarrow U_1 = 5 \cdot 4 \Rightarrow \boxed{U_1 = 20\text{ V}}$$

$$U_2 = R_2 \cdot i \Rightarrow U_2 = 20 \cdot 4 \Rightarrow \boxed{U_2 = 80\text{ V}}$$

Figura III.

Resposta: a) 25 K; b) 4 A; c) 20 V e 80 V

R. 56 Entre os pontos 1 e 2 do circuito da figura abaixo mantém-se a ddp de 110 V. O cursor C está no ponto médio entre os pontos 3 e 4; a intensidade da corrente elétrica que passa pela lâmpada é de 0,5 A. Calcule a resistência elétrica R_L da lâmpada.

Solução:

Entre os pontos 1, 3 e 4 temos um reostato. Como é aplicada uma ddp entre os pontos 1 e 2, a resistência elétrica do reostato deve ser considerada entre o cursor C e 4, e vale 100 Ω. O reostato e a resistência R_L da lâmpada estão associados em série e são percorridos pela corrente i = 0,5 A.

Pela lei de Ohm, temos:

$$U = R_s \cdot i \Rightarrow 110 = (100 + R_L) \cdot 0{,}5 \Rightarrow 100 + R_L = 220 \Rightarrow \boxed{R_L = 120\ \Omega}$$

Resposta: 120 Ω

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

P. 135 Dois resistores de resistências elétricas respectivamente iguais a 4 Ω e 6 Ω, ao serem associados em série, são percorridos por uma corrente elétrica de intensidade 2 A. Determine:

a) a resistência equivalente da associação;

b) a ddp a que a associação está submetida;

c) a ddp em cada resistor associado.

P. 136 Associam-se em série dois resistores de resistências R_1 = 7 Ω e R_2 = 5 Ω, e à associação aplica-se uma ddp de 120 V.

a) Qual a resistência equivalente da associação?

b) Qual a intensidade de corrente elétrica na associação?

c) Qual a ddp em cada resistor associado?

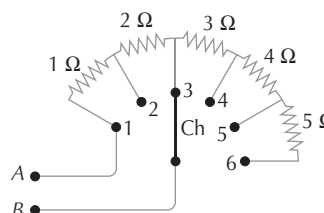
P. 137 Ligam-se em série três resistores de resistências elétricas, respectivamente, 200 Ω, 0,5 kΩ e $3 \cdot 10^{-4}$ MΩ (1 MΩ = 10^6 Ω). Sendo a intensidade de corrente elétrica nos resistores igual a 0,1 A, calcule a ddp aplicada na associação.

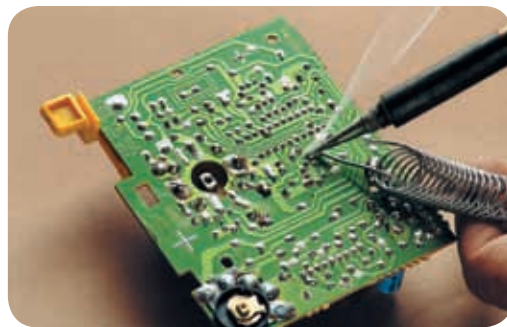
P. 138 A figura representa um reostato de pontos. Na situação esquematizada, o resistor de 1 Ω é percorrido por uma corrente elétrica de intensidade 2 A.

Determine:

a) a ddp entre os terminais A e B;

b) a intensidade de corrente elétrica no resistor de 2 Ω, quando a chave Ch é ligada nos pontos 4, 5 e 6;

c) a máxima resistência elétrica do reostato.

3 Aplicações do efeito Joule

O efeito Joule representa um inconveniente nas máquinas elétricas, que se aquecem durante o funcionamento, e nas linhas de transmissão, devido à perda de energia elétrica que ocorre nesse processo. No entanto, a transformação de energia elétrica em térmica é exatamente o que se deseja nos **aquecedores elétricos**, como, por exemplo, o ferro de passar roupas, o ferro de soldar e os chuveiros elétricos. O efeito Joule também é fundamental nos **fusíveis** e nas **lâmpadas incandescentes**.

Ferro de soldar.

Fusíveis

São genericamente denominados **fusíveis** os dispositivos que têm a finalidade de proteger circuitos elétricos. Seu componente básico é um condutor de baixo ponto de fusão que se funde ao ser atravessado por corrente elétrica de intensidade maior do que um determinado valor.

O fusível deve ser colocado em série com os aparelhos do circuito, de modo que, ao ocorrer a fusão de seu condutor, haja interrupção da passagem da corrente elétrica. Assim, os aparelhos não serão atravessados por correntes de intensidade elevada, as quais poderiam danificá-los.

Na **figura 4**, aparecem esquematizados dois tipos comuns de fusíveis: o fusível de rosca e o fusível de cartucho. No primeiro (**fig. 4A**), o condutor costuma ser um fio de chumbo, que liga seus terminais. No fusível de cartucho (**fig. 4B**), os terminais do dispositivo geralmente são ligados por um fio ou uma lâmina de estanho. A **figura 5** representa o símbolo de fusível utilizado nos circuitos elétricos. Comumente, junto ao símbolo, vem indicado o valor da máxima intensidade de corrente elétrica que ele suporta sem se fundir.

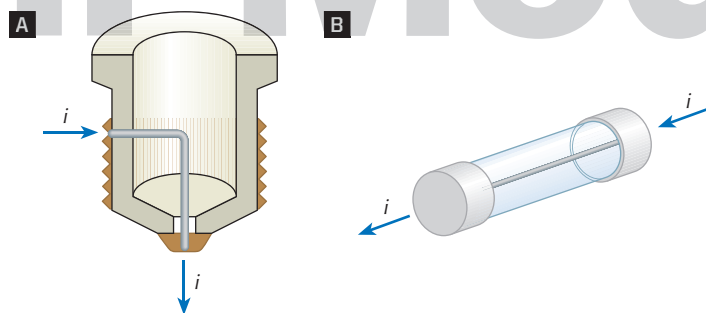



Figura 4. Tipos comuns de fusíveis. (A) fusível de rosca. (B) Fusível de cartucho.

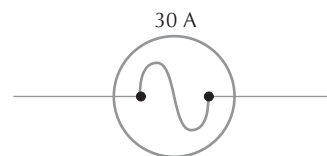



Figura 5. Símbolo do fusível.

Nos fusíveis de cartucho há um cilindro de papelão envolvente que, quando removido, revela a existência de uma lâmina metálica unindo as extremidades do fusível. É essa lâmina que se funde quando a corrente elétrica ultrapassa determinada intensidade.

À esquerda dois fusíveis de rosca, visualizando-se no primeiro o fio de chumbo que une seus terminais; à direita, dois fusíveis de cartucho, tendo sido removido o envoltório do último para mostrar o fio metálico que liga suas extremidades.

Disjuntores

Modernamente, nos circuitos elétricos de residências, edifícios e indústrias, utilizam-se dispositivos de proteção cujo funcionamento se baseia no efeito magnético da corrente elétrica: os **disjuntores**. Em essência, o **disjuntor** é uma chave magnética que se desliga automaticamente quando a intensidade da corrente elétrica ultrapassa determinado valor. Os disjuntores substituem com vantagens os fusíveis, pois não necessitam ser trocados: uma vez removida a causa que provocou seu desligamento, basta acioná-los novamente para que a circulação da corrente elétrica se restabeleça.

Disjuntores.

Disjuntores no quadro de luz de uma casa.

Lâmpada incandescente

A **lâmpada incandescente** é constituída de um fio de tungstênio denominado **filamento**, cuja temperatura de fusão é cerca de 3.400 °C. Esse fio é enrolado segundo uma hélice cilíndrica; seu diâmetro é inferior a 0,1 mm e seu comprimento pode atingir 1 m (**fig. 6**). Passando corrente elétrica no filamento, ele se aquece, pois a energia elétrica dissipada aumenta sua temperatura para valores da ordem de 3.000 °C; desse modo, o filamento torna-se incandescente e começa a emitir luz. A essa temperatura, o tungstênio, se estivesse no ar, seria rapidamente oxidado. A fim de evitar essa oxidação, o filamento é colocado dentro de um bulbo de vidro isento de ar.

Figura 6. Lâmpada incandescente.

Antigamente era feito o vácuo no interior do bulbo, mas esse recurso facilitava a sublimação do filamento. Passou-se, então, a colocar no interior do bulbo um gás inerte, geralmente argônio ou criptônio. A presença do gás retarda a sublimação do filamento, mas não a suprime totalmente.

O brilho de uma lâmpada está relacionado com a ddp à qual for ligada. A **ddp nominal** vem gravada na lâmpada, assim como a sua **potência nominal**. Quando a lâmpada é ligada na ddp nominal, ela dissipa a potência nominal e seu brilho é normal. Quando ligada em ddp menor que a nominal, seu brilho é menor que o normal; já em ddp acima da nominal, a lâmpada dissipa potência maior que a nominal, queimando-se.

Entre na rede No endereço eletrônico http://jersey.uoregon.edu/vlab/Voltage/index.html (acesso em julho/2009), você pode montar, mediante simulações, uma associação de resistores em série com uma lâmpada e uma bateria. Ainda, pode variar o número de resistores associados e a tensão mantida pela bateria. Ao fechar a chave, verifique o comportamento da lâmpada.

Área da seção transversal do filamento de tungstênio nas lâmpadas incandescentes

- **1º caso**: lâmpadas incandescentes de potências diferentes operando sob mesma tensão

Considere duas lâmpadas de 127 V, uma de potência 40 W e outra de potência 100 W.

Vamos supor que seus filamentos de tungstênio tenham o mesmo comprimento. A lâmpada de 100 W possui filamento mais grosso do que a de 40 W.

$$Pot = \frac{U^2}{R}, \text{ com } R = \rho \cdot \frac{L}{A}, \text{ vem: } Pot = \frac{U^2}{\rho \cdot \frac{L}{A}}, \text{ portanto: } \boxed{A = \frac{\rho \cdot L \cdot Pot}{U^2}}$$

Sendo U constante concluímos que:

> A área A da seção transversal é diretamente proporcional à potência.

- **2º caso**: lâmpadas incandescentes de mesma potência operando sob tensões diferentes

Considere duas lâmpadas de mesma potência, sendo que uma delas é de 127 V e a outra de 220 V. Vamos supor que seus filamentos de tungstênio tenham o mesmo comprimento. A lâmpada de 220 V possui filamento mais fino do que a de 127 V.

De $A = \frac{\rho \cdot L \cdot Pot}{U^2}$ e sendo a potência constante, concluímos que:

> A área da seção transversal é inversamente proporcional ao quadrado da tensão.

A emissão de luz na lâmpada incandescente

Quando a corrente elétrica atravessa o filamento de uma lâmpada incandescente, ocorre a transformação de energia elétrica em energia térmica devido às colisões dos elétrons que constituem a corrente elétrica com os átomos do filamento. À medida que a temperatura se eleva, torna-se mais intensa a emissão de energia radiante (ondas eletromagnéticas) pelo filamento. Entretanto, nem toda radiação emitida é visível. Por aquecimento, os átomos do filamento são excitados, isto é, seus elétrons passam para um nível energético mais elevado, saltando de uma órbita mais interna para outra mais externa. Quando o elétron volta a seu nível de energia anterior, ele emite, na forma de luz, a energia que recebeu, caso a frequência da radiação emitida esteja entre $4{,}0 \cdot 10^{14}$ Hz e $7{,}5 \cdot 10^{14}$ Hz.

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

R. 57 Um resistor de resistência elétrica 121 Ω tem dissipação nominal 100 W. Calcule:

a) a máxima ddp à qual ele poderá ser ligado;

b) a máxima corrente elétrica que pode percorrê-lo.

Solução:

a) **Dissipação nominal** é a potência máxima que o resistor pode dissipar: $Pot_{máx.} = 100$ W. Como conhecemos a $Pot_{máx.}$ e a resistência elétrica do resistor $R = 121\ \Omega$, utilizemos a fórmula:

R = 121 Ω; $i_{máx.}$; $U_{máx.} = 110$ V

$$Pot_{máx.} = \frac{U^2_{máx.}}{R} \Rightarrow U^2_{máx.} = Pot_{máx.} \cdot R \Rightarrow U^2_{máx.} = 100 \cdot 121 \Rightarrow \boxed{U_{máx.} = 110\text{ V}}$$

b) Pela lei de Ohm, temos: $i_{máx.} = \dfrac{U_{máx.}}{R} \Rightarrow i_{máx.} = \dfrac{110}{121} \Rightarrow \boxed{i_{máx.} \simeq 0{,}91\text{ A}}$

Resposta: a) 110 V; b) ≃ 0,91 A

Observação:

Nesse resistor deve ser gravada a especificação (100 W — 110 V).

R. 58 Duas lâmpadas, uma de 10 W — 110 V e outra de 100 W — 110 V, são ligadas em série a uma tomada de 220 V. O que acontece com as lâmpadas?

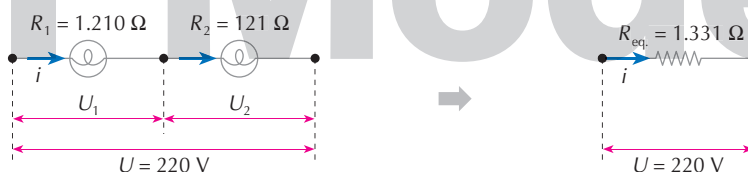
Solução:

Sendo dados os valores nominais das lâmpadas (potência, ddp), determinemos suas resistências.

Como $Pot = \dfrac{U^2}{R}$, vem $R = \dfrac{U^2}{Pot}$. Assim:

$$R_1 = \frac{(110)^2}{10} \Rightarrow R_1 = 1.210\ \Omega \quad \text{e} \quad R_2 = \frac{(110)^2}{100} \Rightarrow R_2 = 121\ \Omega$$

Ligando-as em série, a resistência equivalente é: $R_{eq.} = R_1 + R_2 \Rightarrow R_{eq.} = 1.331\ \Omega$

As duas lâmpadas são percorridas pela mesma corrente elétrica i:

Pela lei de Ohm, temos: $i = \dfrac{U}{R_{eq.}} \Rightarrow i = \dfrac{220}{1.331} \Rightarrow i = \dfrac{20}{121}$ A

Em cada lâmpada têm-se as ddps:

$$U_1 = R_1 \cdot i \Rightarrow U_1 = 1.210 \cdot \frac{20}{121} \Rightarrow \boxed{U_1 = 200\text{ V}} \quad \text{e} \quad U_2 = R_2 \cdot i \Rightarrow U_2 = 121 \cdot \frac{20}{121} \Rightarrow \boxed{U_2 = 20\text{ V}}$$

Resposta: Na lâmpada de 10 W, a ddp é maior que a nominal (200 V > 110 V) e assim ela apresentará brilho acima do normal e logo queimará. Na de 100 W, a ddp é menor que a nominal (20 V < 110 V) e seu brilho será menor que o normal. Entretanto, quando a lâmpada de 10 W queimar, a de 100 W se apagará, pois como estão ligadas em série, o circuito ficará aberto.

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

P. 139 Um resistor de resistência elétrica 10 Ω tem dissipação nominal de 1 W. Determine:

a) a máxima ddp à qual pode ser submetido;

b) a máxima corrente elétrica que pode percorrê-lo.

P. 140 Um eletricista compra três lâmpadas com as seguintes características: L_1 (200 W — 110 V), L_2 (100 W — 110 V) e L_3 (25 W — 110 V). Em seguida, ele associa as três lâmpadas em série e aplica à associação uma ddp de 220 V. O que acontece com as lâmpadas?

V3_P1_UN_B_CAP_07a.indd 159 19.09.09 09:34:14

Seção 7.2

Associação de resistores em paralelo

Objetivos

- Analisar a associação de resistores em paralelo.
- Compreender como obter a resistência do resistor equivalente em uma associação em paralelo.

Vários resistores estão associados em **paralelo** quando são **ligados pelos terminais**, de modo a ficarem submetidos **à mesma ddp**. Na **figura 7**, representamos três resistores de resistências elétricas R_1, R_2 e R_3, associados em paralelo, e o correspondente resistor equivalente, cuja resistência R_p é a resistência da associação. U é a ddp comum aos resistores.

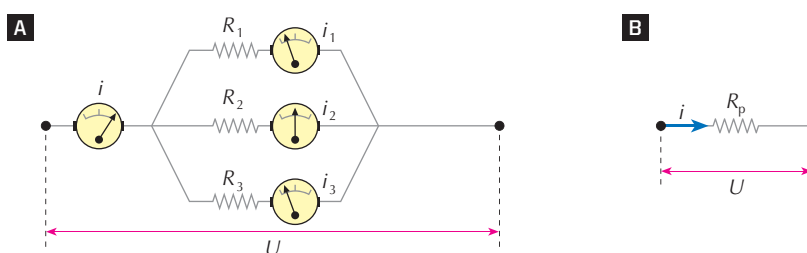



Figura 7. (A) Três resistores associados em paralelo. (B) O resistor equivalente.

A intensidade de corrente elétrica i do circuito principal divide-se, nos resistores associados, em valores i_1, i_2 e i_3. Com a ajuda de amperímetros convenientemente dispostos verifica-se que:

$$i = i_1 + i_2 + i_3$$

A intensidade de corrente em uma associação de resistores em paralelo é igual à soma das intensidades das correntes nos resistores associados.

Pela lei de Ohm, temos $U = R_1 \cdot i_1$, $U = R_2 \cdot i_2$, $U = R_3 \cdot i_3$. Portanto: $R_1 \cdot i_1 = R_2 \cdot i_2 = R_3 \cdot i_3$

Em uma associação de resistores em paralelo, o produto da resistência elétrica de cada um deles pela respectiva intensidade de corrente elétrica é igual para todos os resistores associados.

Ainda da lei de Ohm:

$$i_1 = \frac{U}{R_1},\ i_2 = \frac{U}{R_2} \quad \text{e} \quad i_3 = \frac{U}{R_3}$$

Em uma associação de resistores em paralelo, a intensidade de corrente elétrica em cada resistor é inversamente proporcional à sua resistência elétrica.

Submetido à ddp U da associação, o resistor equivalente à associação R_p será percorrido pela corrente total i, então:

$$U = R_p \cdot i \Rightarrow i = \frac{U}{R_p}$$

Como $i = i_1 + i_2 + i_3$ vem:

$$\frac{U}{R_p} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3} \Rightarrow \boxed{\frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}$$

Em uma associação de resistores em paralelo, o inverso da resistência equivalente da associação é igual à soma dos inversos das resistências associadas.

No caso de **dois resistores** associados em paralelo temos:

$$\frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \Rightarrow \frac{1}{R_p} = \frac{R_1 + R_2}{R_1R_2} \Rightarrow \boxed{R_p = \frac{R_1R_2}{R_1 + R_2}}$$

Portanto, no caso da associação de dois resistores em paralelo, a resistência equivalente é dada pela razão entre o produto $(R_1 \cdot R_2)$, e a soma $(R_1 + R_2)$ das resistências dos resistores.

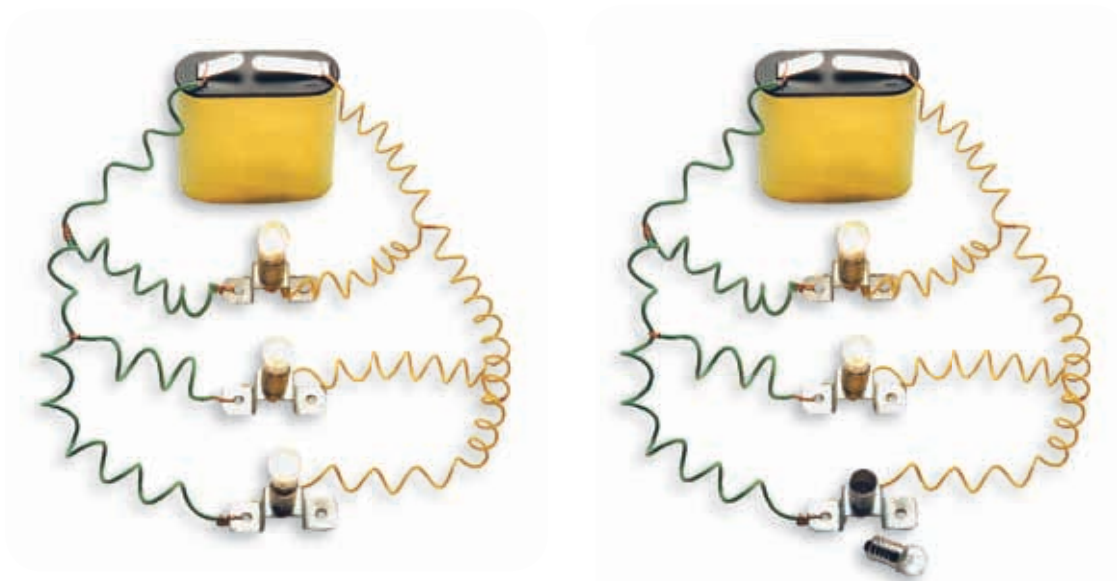
Se tivermos n resistores iguais, de resistência R cada um, obteremos:

$R_1 = R_2 = R_3 = ... = R_n = R$ e, então:

$$\frac{1}{R_p} = \frac{1}{R} + \frac{1}{R} + ... + \frac{1}{R} \Rightarrow \frac{1}{R_p} = \frac{n}{R} \Rightarrow \boxed{R_p = \frac{R}{n}}$$

A potência elétrica dissipada em cada resistor da associação é dada por:

$$Pot_1 = \frac{U^2}{R_1}, \quad Pot_2 = \frac{U^2}{R_2} \quad \text{e} \quad Pot_3 = \frac{U^2}{R_3}$$

Em uma associação de resistores em paralelo, a potência dissipada em cada resistor é inversamente proporcional à sua resistência elétrica.

As três lâmpadas estão associadas em paralelo, isto é, sob uma mesma ddp; quando uma é removida, as outras mantêm sua luminosidade, indicando não ter havido alteração nas correntes elétricas que as atravessam.

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

R. 59 Um resistor de 5 Ω e um resistor de 20 Ω são associados em paralelo e a essa associação aplica-se uma ddp de 100 V.

a) Qual a resistência equivalente da associação?

b) Qual a intensidade de corrente elétrica em cada resistor?

c) Qual a intensidade de corrente elétrica na associação?

$R_1 = 5\ \Omega$; $R_2 = 20\ \Omega$; $U = 100$ V

Solução:

A sequência para a solução do exercício está esquematizada nas figuras ao lado.

a) A resistência equivalente é (**fig. I**):

$$R_p = \frac{R_1R_2}{R_1 + R_2} \Rightarrow R_p = \frac{5 \cdot 20}{5 + 20} \Rightarrow \boxed{R_p = 4\ \Omega}$$

R_p; $U = 100$ V

Figura I.

b) Pela lei de Ohm, as intensidades de corrente elétrica são (**fig. II**):

$$i_1 = \frac{U}{R_1} \Rightarrow i_1 = \frac{100}{5} \Rightarrow \boxed{i_1 = 20\text{ A}}$$

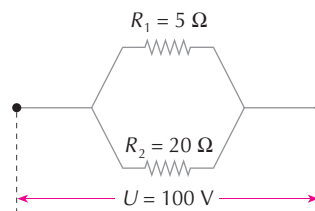
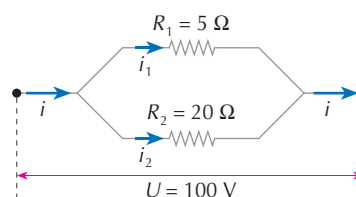
$$i_2 = \frac{U}{R_2} \Rightarrow i_2 = \frac{100}{20} \Rightarrow \boxed{i_2 = 5\text{ A}}$$

$R_1 = 5\ \Omega$; i_1; $R_2 = 20\ \Omega$; i_2; i; $U = 100$ V

Figura II.

c) A intensidade de corrente elétrica na associação valerá:

$$i = i_1 + i_2 \Rightarrow i = 20 + 5 \Rightarrow \boxed{i = 25\text{ A}}$$

Resposta: a) 4 Ω; b) $i_1 = 20$ A e $i_2 = 5$ A; c) 25 A

R. 60 Na associação ao lado, A é um aquecedor onde está gravado (200 W — 100 V) e *f* é um fusível de resistência desprezível que suporta uma corrente elétrica máxima de 3 A. Calcule o menor valor da resistência elétrica de um resistor que pode ser ligado em paralelo com o aquecedor sem queimar o fusível.

Solução:

O aquecedor está ligado corretamente, pois $U = 100$ V e, desse modo, ele dissipa a potência $Pot = 200$ W. Então, a corrente que o percorre terá intensidade:

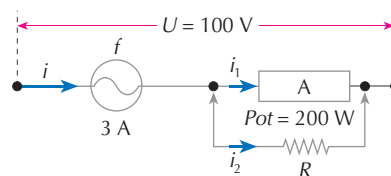
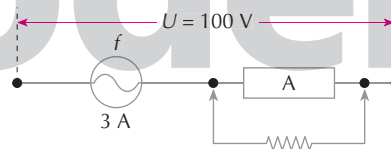
$$Pot = U \cdot i_1 \Rightarrow i_1 = \frac{Pot}{U} \Rightarrow i_1 = \frac{200}{100} \Rightarrow i_1 = 2\text{ A}$$

Deve-se ter $i = 3$ A, pois acima desse valor o fusível queima.

No resistor R, em paralelo, poderá passar a corrente i_2, tal que:

$$i = i_1 + i_2 \Rightarrow i_2 = i - i_1 = 3 - 2 \Rightarrow i_2 = 1\text{ A}$$

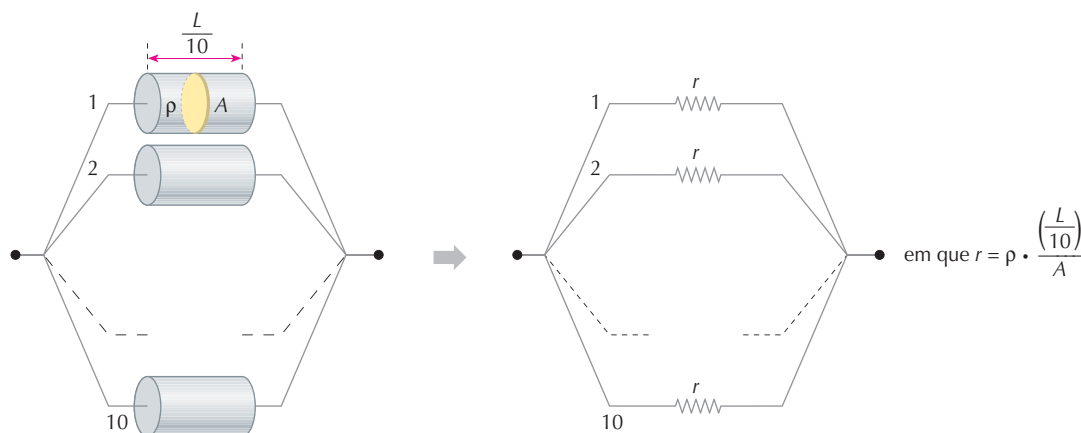
Portanto, pela lei de Ohm: $R = \frac{U}{i_2} \Rightarrow R = \frac{100}{1} \Rightarrow \boxed{R = 100\ \Omega}$

Resposta: 100 Ω

R. 61 Um fio condutor homogêneo, de seção transversal constante de área A e comprimento L, tem resistência elétrica R. Esse fio é dividido em 10 pedaços iguais que são ligados em paralelo, formando um cabo cuja resistência vale R_c. Calcule a relação entre R_c e R.

Solução:

O fio condutor de resistividade ρ pode ser esquematizado da seguinte maneira:

em que $R = \rho \cdot \frac{L}{A}$

Para o cabo formado temos:

A resistência elétrica r de cada pedaço valerá: $r = \frac{1}{10} \cdot \rho \cdot \frac{L}{A} \Rightarrow r = \frac{1}{10} \cdot R$

Por outro lado, a resistência elétrica do cabo R_c será equivalente a 10 resistores iguais de resistência elétrica r cada um, associados em paralelo. Portanto:

$$R_c = \frac{r}{10} \Rightarrow R_c = \frac{\left(\frac{1}{10} \cdot R\right)}{10} \Rightarrow R_c = \frac{1}{100} \cdot R \Rightarrow \boxed{\frac{R_c}{R} = \frac{1}{100}}$$

Resposta: $\frac{1}{100}$

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

P. 141 Associam-se em paralelo dois resistores de resistências $R_1 = 20\ \Omega$ e $R_2 = 30\ \Omega$, e a essa associação aplica-se a ddp de 120 V.

a) Qual a resistência equivalente da associação?

b) Quais as intensidades de corrente elétrica em cada resistor?

c) Qual a intensidade de corrente elétrica na associação?

P. 142 Três lâmpadas incandescentes iguais estão associadas em paralelo, e a ddp entre os terminais da associação é mantida constante. Se uma das lâmpadas queimar, o que ocorrerá com a intensidade de corrente elétrica em cada uma das outras?

P. 143 Em uma residência são ligados em paralelo, simultaneamente, 12 lâmpadas de 100 W cada, um ferro elétrico de 720 W, um chuveiro de 2.400 W, um aquecedor de 1.200 W e um liquidificador de 360 W. A ddp constante na residência é de 120 V. Calcule a intensidade de corrente elétrica que atravessa o fusível que protege o circuito.

P. 144 (Fuvest-SP) Várias lâmpadas idênticas estão ligadas em paralelo a uma rede de alimentação de 110 V. Sabendo-se que a corrente elétrica que percorre cada lâmpada é de $\frac{6}{11}$ A, pergunta-se:

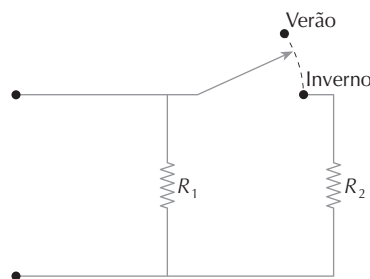
a) Qual a potência dissipada em cada lâmpada?

b) Se a instalação das lâmpadas estiver protegida por um fusível que suporta até 15 A, quantas lâmpadas, no máximo, podem ser ligadas?

P. 145 (UFRJ) Você dispõe de várias lâmpadas idênticas, de 60 W — 120 V, e de uma fonte de tensão capaz de manter em seus terminais, sob quaisquer condições, uma diferença de potencial constante e igual a 120 V. Considere as lâmpadas funcionando normalmente, isto é, com seu brilho máximo. Calcule quantas lâmpadas, no máximo, podem ser ligadas a essa fonte sem queimar um fusível de 15 A que protege a rede.

P. 146 (PUC-RJ) O sistema de aquecimento de um chuveiro elétrico está representado na figura abaixo. Com a chave na posição "inverno", o chuveiro dissipa 2.200 W, enquanto, na posição "verão", dissipa 1.100 W. A tensão na rede de alimentação é de 110 V. Admitindo que os valores dessas resistências não variam com a temperatura, responda:

a) Qual o valor da corrente que passa pelo fio de alimentação do chuveiro quando este é ligado na posição "inverno"?

b) Qual o valor das resistências R_1 e R_2?

Seção 7.3

Associação mista de resistores

Objetivo

▶ Analisar a associação mista de resistores.

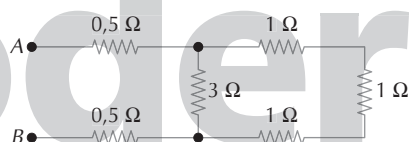
Termos e conceitos

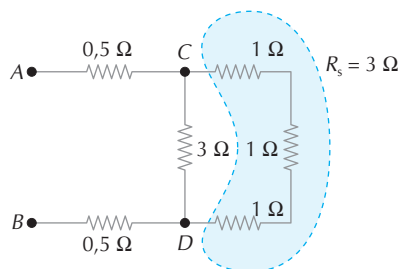
• nós
• terminais de uma associação de resistores

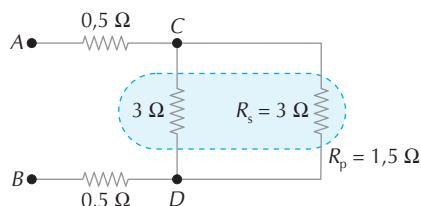
As **associações mistas** de resistores são aquelas constituídas por associações em paralelo e associações em série. Qualquer associação mista pode ser substituída por um resistor equivalente, que se obtém considerando-se que cada associação parcial (em série ou em paralelo) equivale a apenas um resistor.

Para determinar a resistência equivalente em uma associação é muito útil designar os **nós** e os **terminais** da associação por letras. **Nós** são os pontos em que a corrente se divide; **terminais**, os pontos entre os quais se quer determinar a resistência equivalente. Simplifica-se aos poucos o esquema resolvendo as associações em que os resistores estejam claramente em série (um depois do outro, sem ramificação) ou em paralelo (ligados aos mesmos pontos). **Cuidado:** durante o processo não podem desaparecer os terminais da associação.

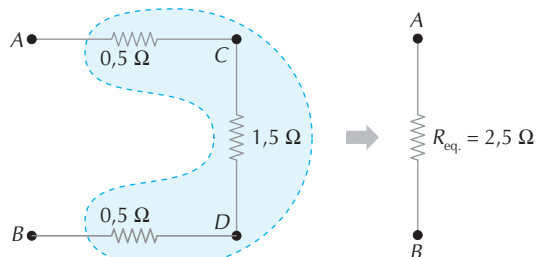
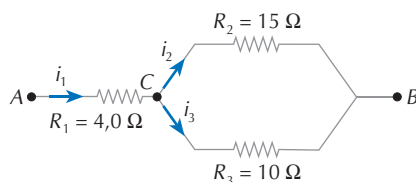
EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

R. 62 Dada a associação na figura, calcule a resistência equivalente entre os pontos A e B.

Solução:
Nessa associação, A e B são os **terminais** (pontos entre os quais se quer calcular a resistência equivalente); chamemos de C e D os **nós** (pontos em que a corrente se divide). De início, só temos certeza de que os três resistores de 1 Ω cada estão associados em série; então:

$$R_s = 1 + 1 + 1 \Rightarrow R_s = 3\ \Omega$$

Substituindo os três resistores pelo seu equivalente e refazendo o esquema, os dois resistores de 3 Ω cada, entre C e D, estão associados em paralelo; então, sendo os dois resistores iguais, vem:

$$R_p = \frac{R_s}{n} \Rightarrow R_p = \frac{3}{2} \Rightarrow R_p = 1{,}5\ \Omega$$

Finalmente, no esquema ao lado, os resistores 0,5 Ω, 1,5 Ω e 0,5 Ω estão associados em série entre os terminais A e B. A resistência equivalente da associação será:

$$R_{eq.} = 0{,}5 + 1{,}5 + 0{,}5 \Rightarrow \boxed{R_{eq.} = 2{,}5\ \Omega}$$

Resposta: 2,5 Ω

R. 63 No circuito elétrico esquematizado abaixo tem-se $i_2 = 2,0$ A. Determine:
a) a intensidade da corrente elétrica i_1;
b) a diferença de potencial entre os pontos A e B.

Solução:

a) Os resistores de resistências R_2 e R_3 estão em paralelo e, portanto, sob mesma ddp:

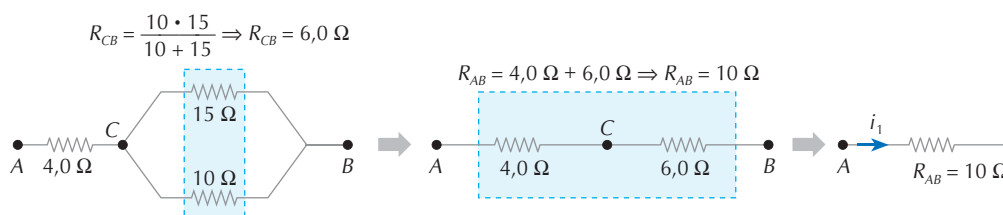
$$R_2 \cdot i_2 = R_3 \cdot i_3 \Rightarrow 15 \cdot 2,0 = 10 \cdot i_3 \Rightarrow i_3 = 3,0\text{ A}$$

Assim, a intensidade da corrente elétrica total i_1 será:

$$i_1 = i_2 + i_3 \Rightarrow i_1 = 2,0 + 3,0 \Rightarrow \boxed{i_1 = 5,0\text{ A}}$$

b) Vamos, inicialmente, determinar a resistência equivalente da associação:

$$R_{CB} = \frac{10 \cdot 15}{10 + 15} \Rightarrow R_{CB} = 6,0\ \Omega$$

$$R_{AB} = 4,0\ \Omega + 6,0\ \Omega \Rightarrow R_{AB} = 10\ \Omega$$

A resistência equivalente $R_{AB} = 10\ \Omega$ é percorrida pela corrente elétrica $i_1 = 5,0$ A. Logo:

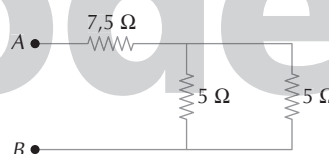
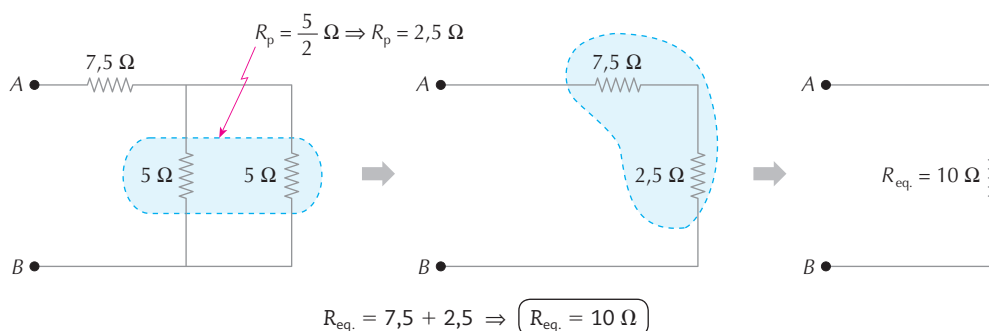
$$U_{AB} = R_{AB} \cdot i_1 \Rightarrow U_{AB} = 10 \cdot 5,0 \Rightarrow \boxed{U_{AB} = 50\text{ V}}$$

Resposta: a) 5,0 A; b) 50 V

R. 64 No circuito esquematizado, a ddp entre os terminais A e B vale 100 V. Determine:
a) a resistência equivalente entre os pontos A e B;
b) a intensidade de corrente elétrica no resistor de 7,5 Ω;
c) a intensidade de corrente elétrica em cada um dos resistores de 5 Ω.

Solução:

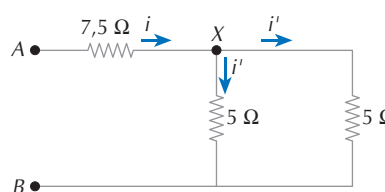
a) Resolvendo a associação, temos:

$$R_{eq.} = 7,5 + 2,5 \Rightarrow \boxed{R_{eq.} = 10\ \Omega}$$

b) Sendo $U_{AB} = 100$ V, a aplicação da lei de Ohm à resistência equivalente fornece:

$$U_{AB} = R_{eq.} \cdot i \Rightarrow 100 = 10 \cdot i \Rightarrow \boxed{i = 10\text{ A}}$$

c) Ao atingir o nó X indicado na figura, a corrente total $i = 10$ A que atravessa o resistor de 7,5 Ω se divide em duas correntes iguais, cada uma com intensidade i', tal que:

$$i' = \frac{i}{2} \Rightarrow i' = \frac{10}{2} \Rightarrow \boxed{i' = 5\text{ A}}$$

Resposta: a) 10 Ω; b) 10 A; c) 5 A

R. 65 O resistor de 4 Ω do circuito esquematizado é percorrido por corrente elétrica de intensidade 3 A. Determine:

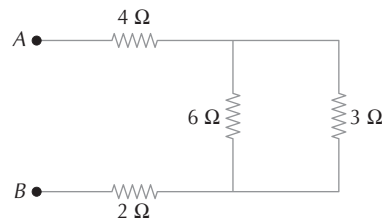
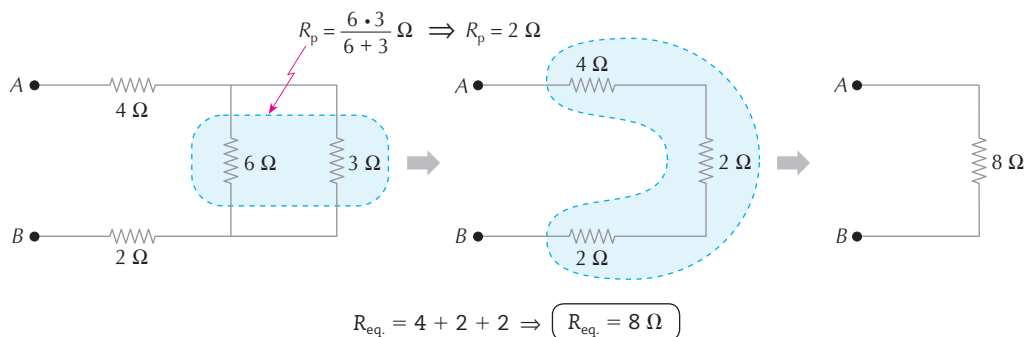
a) a resistência equivalente entre os pontos *A* e *B*;

b) a ddp entre os terminais *A* e *B* do circuito;

c) a intensidade da corrente elétrica em cada um dos resistores de 6 Ω e 3 Ω.

Solução:

a) Resolvendo a associação, temos:

$$R_{eq.} = 4 + 2 + 2 \Rightarrow \boxed{R_{eq.} = 8\ \Omega}$$

b) Aplicando a lei de Ohm à resistência equivalente, pois a corrente elétrica que percorre o resistor de 4 Ω (i = 3 A) é a corrente total, temos:

$$U_{AB} = R_{eq.} \cdot i \Rightarrow U_{AB} = 8 \cdot 3 \Rightarrow \boxed{U_{AB} = 24\ V}$$

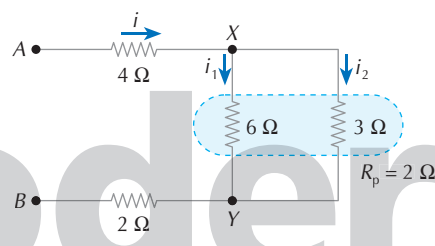
c) Para determinar a intensidade das correntes elétricas nos resistores de 6 Ω e 3 Ω, devemos determinar a ddp entre os pontos X e Y destacados na figura:

$$U_{XY} = R_p \cdot i \Rightarrow U_{XY} = 2 \cdot 3 \Rightarrow U_{XY} = 6\ V$$

Aplicando a lei de Ohm a cada um dos resistores entre X e Y, temos:

$$U_{XY} = R_1 \cdot i_1 \Rightarrow 6 = 6 \cdot i_1 \Rightarrow \boxed{i_1 = 1\ A}$$

$$U_{XY} = R_2 \cdot i_2 \Rightarrow 6 = 3 \cdot i_2 \Rightarrow \boxed{i_2 = 2\ A}$$

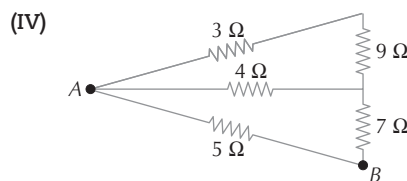
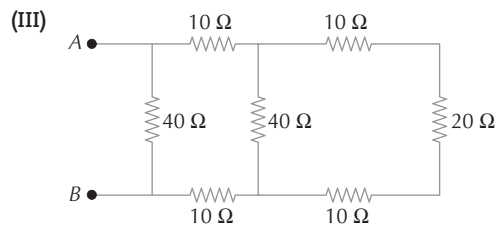
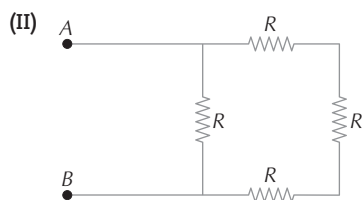
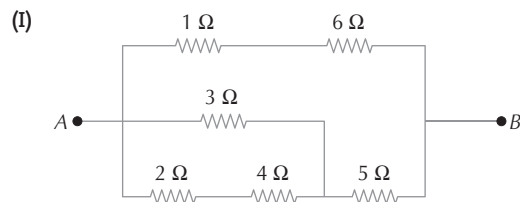
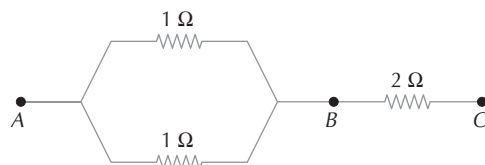
Resposta: a) 8 Ω; b) 24 V; c) $i_1 = 1$ A e $i_2 = 2$ A

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

P. 147 Calcule a resistência equivalente das associações esquematizadas abaixo entre os terminais denominados A e B.

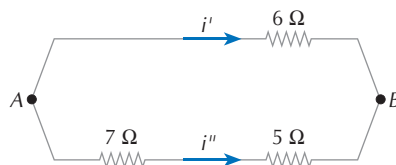
(I)

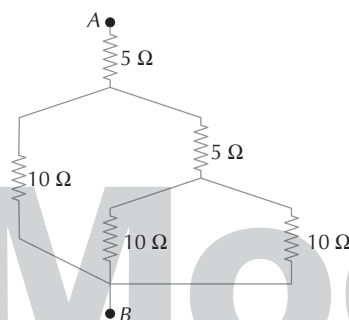
(II)

(III)

(IV)

P. 148 Na associação da figura abaixo, a ddp entre *A* e *C* é 120 V.

a) Qual a ddp entre *A* e *B*?

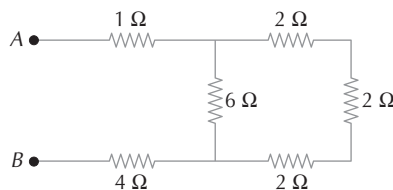
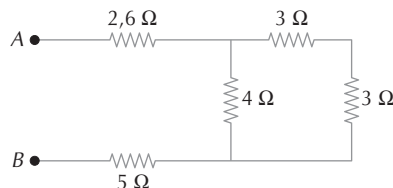
b) Qual a intensidade de corrente elétrica em cada resistência de 1 Ω?

P. 149 Na associação da figura abaixo, sendo i′ = 6 A, calcule a intensidade de corrente elétrica i″.

P. 150 Entre os terminais *A* e *B* da figura aplica-se a ddp de 200 V. Calcule as intensidades de corrente elétrica em cada resistor.

A
5 Ω
5 Ω
10 Ω
10 Ω
10 Ω
B

P. 151 A ddp entre os terminais *A* e *B* do circuito esquematizado vale 80 V. Determine:

a) a intensidade de corrente elétrica no resistor de 4 Ω;

b) a ddp no resistor de 6 Ω;

c) a intensidade de corrente elétrica em cada um dos resistores de 2 Ω.

P. 152 O resistor de 5 Ω da associação esquematizada é percorrido por corrente elétrica de intensidade 4 A.

Determine:

a) a resistência equivalente entre os terminais *A* e *B*;

b) a ddp entre os pontos *A* e *B*;

c) a intensidade de corrente elétrica no resistor de 4 Ω e em cada um dos resistores de 3 Ω.

Conteúdo digital Moderna PLUS http://www.modernaplus.com.br
Simulador: *Circuitos elétricos simples*

Seção 7.4

Curto-circuito

Objetivos

- Apresentar as principais características de um curto-circuito.
- Analisar o funcionamento da chave reguladora de temperatura em um chuveiro elétrico.

Provoca-se um **curto-circuito** entre dois pontos de um circuito quando esses pontos são ligados por um condutor de resistência desprezível.

Na **figura 8A**, entre os pontos A e B, temos um aparelho elétrico percorrido por corrente de intensidade I. Ligando-se um condutor de resistência desprezível entre esses pontos (em paralelo ao aparelho), provoca-se um curto-circuito entre A e B (**fig. 8B**).

A

B

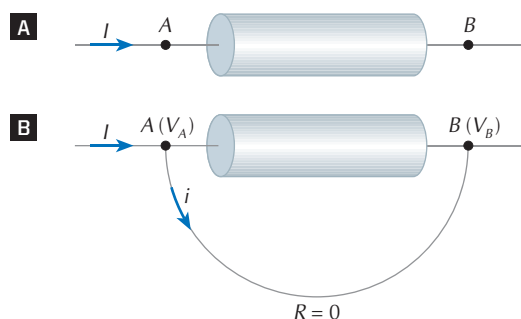



Figura 8. Aparelho elétrico ligado entre A e B (A) e colocado em curto-circuito (B).

No condutor, pela lei de Ohm, temos:

$$V_A - V_B = R \cdot i = 0 \Rightarrow V_A - V_B = 0 \Rightarrow V_A = V_B$$

Mantida a corrente I, esta passará totalmente pelo condutor ($I = i$). Se o aparelho elétrico for, por exemplo, um resistor, ele deixará de funcionar; ao mudarmos o esquema do circuito, ele poderá ser retirado (**fig. 9**).

A

B

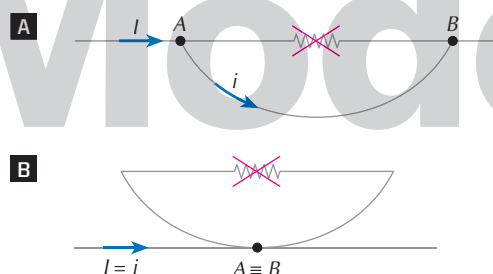



Figura 9. (A) O resistor está em curto-circuito. (B) Os pontos A e B, de mesmo potencial, são considerados coincidentes.

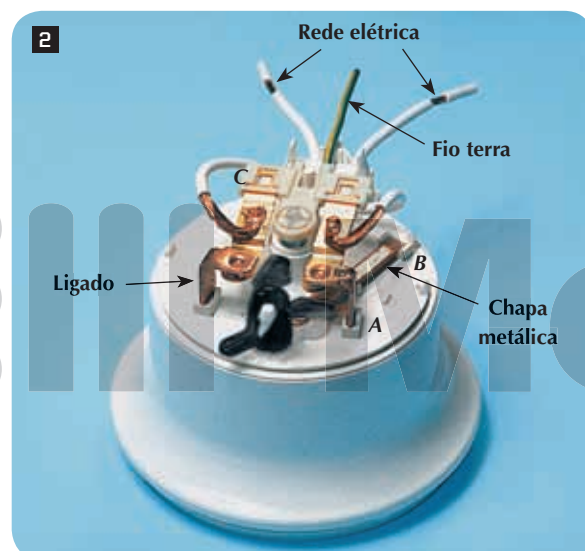
> Sempre que dois pontos de um circuito tiverem o mesmo potencial, eles poderão ser considerados coincidentes em um novo esquema do mesmo circuito.

Na associação apresentada, a lâmpada do meio está em curto-circuito e, por isso, permanece apagada. Responda: o brilho das outras lâmpadas aumentaria ou diminuiria, comparando com a situação em que a lâmpada do meio não estava em curto-circuito? Por quê?

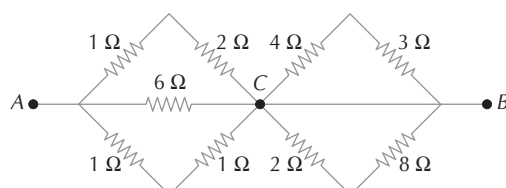
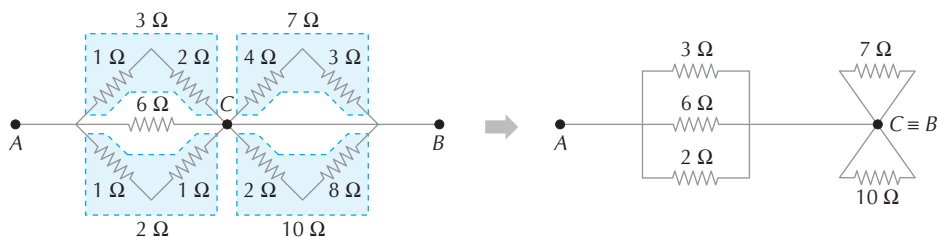
O chuveiro elétrico

Observe o resistor de um chuveiro (foto 1). Ao colocar a chave na posição "inverno", os pontos *A* e *B* ficam em curto-circuito e o resistor a ser atravessado pela corrente elétrica vai de *B* até *C*. Na parte superior do chuveiro destacamos a chave na posição "inverno" e a chapa metálica que produz o curto-circuito entre os pontos *A* e *B* (foto 2).

Com a chave na posição "verão", todo o resistor (de *A* até *C*) é percorrido pela corrente elétrica. Portanto, nessa posição, a resistência elétrica do chuveiro é maior do que na posição "inverno".

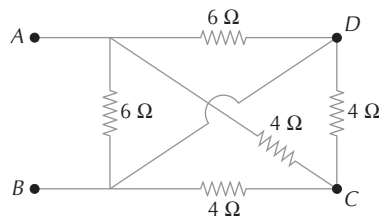
Na foto 3 o chuveiro está desligado. É interessante notar que, quando abrimos a torneira do chuveiro, ele liga automaticamente. Isso ocorre porque o chuveiro possui um diafragma que, pressionado pela água, estabelece a ligação elétrica.

Conteúdo digital Moderna PLUS http://www.modernaplus.com.br
A Física em nosso Mundo: *Instalação elétrica domiciliar*

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

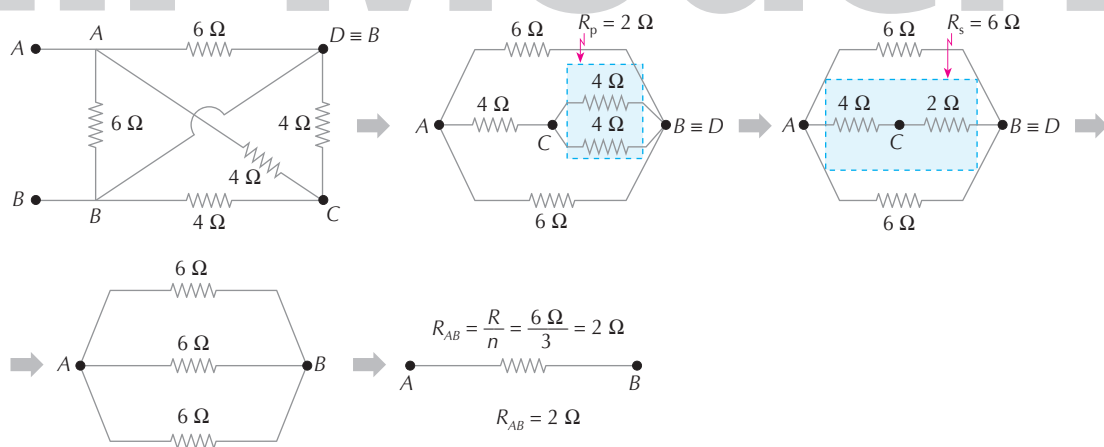
R. 66 Dada a associação na figura abaixo, calcule a resistência equivalente entre os terminais *A* e *B*.

Solução:
O nó *C* e o terminal *B* estão ligados por um condutor de resistência desprezível. Portanto, o trecho *CB* está em curto-circuito ($V_C = V_B$) e os pontos *B* e *C* podem ser considerados coincidentes.

Os resistores de 3 Ω, 6 Ω e 2 Ω estão associados em paralelo e os resistores de 7 Ω e 10 Ω não funcionam, pois seus terminais são coincidentes ($C \equiv B$). A resistência equivalente entre *A* e *B* valerá:

$$\frac{1}{R_{AB}} = \frac{1}{3} + \frac{1}{6} + \frac{1}{2} \Rightarrow \frac{1}{R_{AB}} = \frac{2+1+3}{6} \Rightarrow \frac{1}{R_{AB}} = \frac{6}{6} \Rightarrow \boxed{R_{AB} = 1\ \Omega}$$

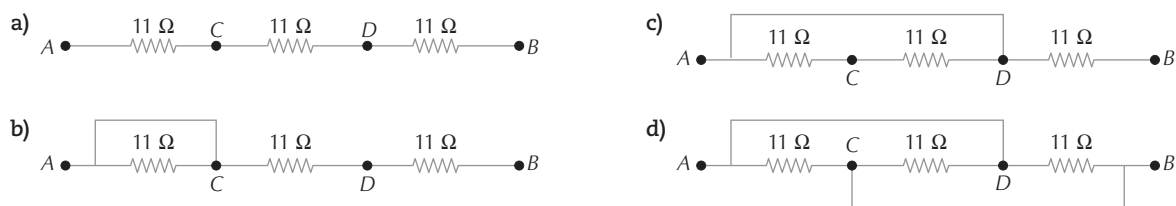
Resposta: 1 Ω

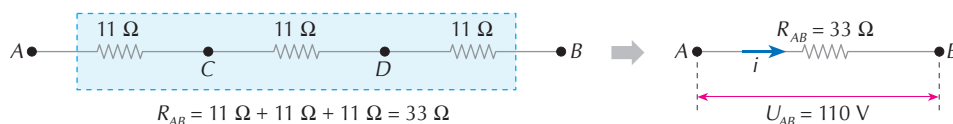
R. 67 Para a associação esquematizada, determine a resistência equivalente entre os terminais *A* e *B*.

Solução:
O nó *D* e o terminal *B* estão ligados por um condutor de resistência desprezível. Portanto, o trecho *DB* está em curto-circuito ($V_B = V_D$) e os pontos *B* e *D* podem ser considerados coincidentes. Nessas condições refaz-se o esquema transportando-se os resistores.
Temos a seguinte sequência:

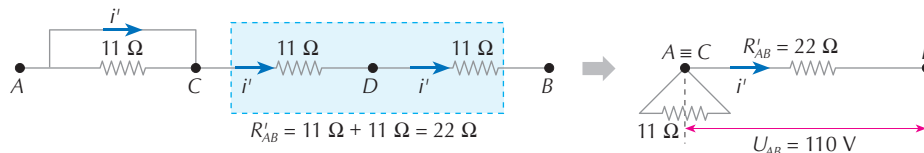
$$R_{AB} = \frac{R}{n} = \frac{6\ \Omega}{3} = 2\ \Omega$$

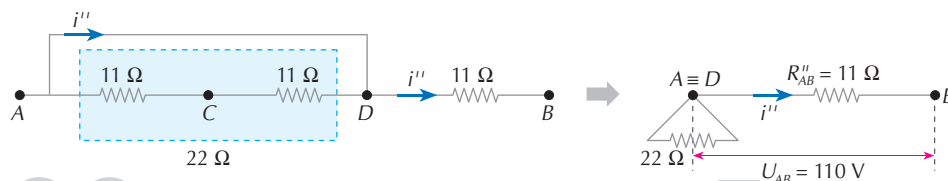
$R_{AB} = 2\ \Omega$

Resposta: 2 Ω

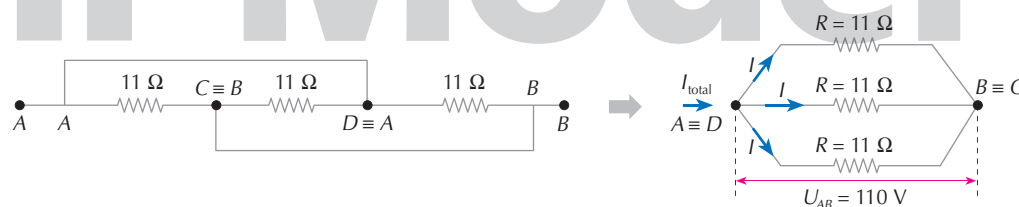
R. 68 Têm-se três resistores iguais, de resistência 11 Ω, uma fonte que mantém entre *A* e *B* a ddp de 110 V e fios de resistência nula. Qual a intensidade de corrente elétrica em cada resistor nas situações esquematizadas abaixo, segundo as colocações dos fios de resistência nula?

a)
c)
b)
d)

Solução:

a) Os três resistores estão associados em série:

Pela lei de Ohm, temos: $i = \frac{U_{AB}}{R_{AB}} \Rightarrow i = \frac{110}{33} \Rightarrow \boxed{i \simeq 3{,}3\ A}$

b) Os pontos A e C estão em curto-circuito:

Pela lei de Ohm, temos: $i' = \frac{U_{AB}}{R'_{AB}} \Rightarrow i' = \frac{110}{22} \Rightarrow \boxed{i' = 5\ A}$

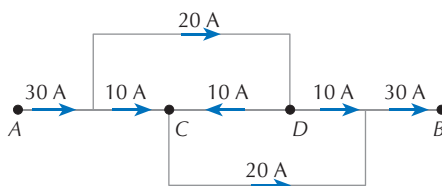
c) Os pontos A e D estão em curto-circuito:

Pela lei de Ohm, temos: $i'' = \frac{U_{AB}}{R''_{AB}} \Rightarrow i'' = \frac{110}{11} \Rightarrow \boxed{i'' = 10\ A}$

d) Os pontos A e D estão em curto-circuito, bem como os pontos C e B:

Nesse caso, em cada resistor R, a intensidade da corrente elétrica será:

$$I = \frac{U_{AB}}{R} \Rightarrow I = \frac{110}{11} \Rightarrow \boxed{I = 10\ A}$$

e a corrente total (I_{total}):

$$I_{total} = 3 \cdot 10 \Rightarrow \boxed{I_{total} = 30\ A}$$

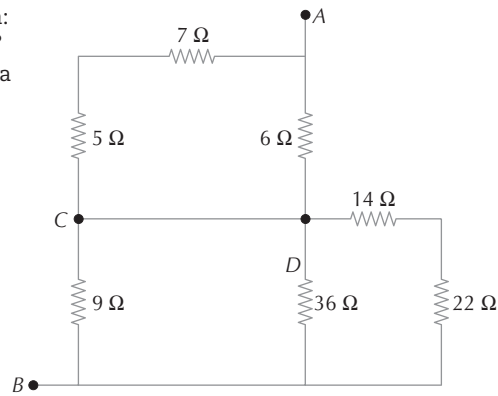
Em cada trecho do circuito têm-se as correntes esquematizadas:

Resposta: a) ≃ 3,3 A; b) 5 A; c) 10 A; d) 10 A

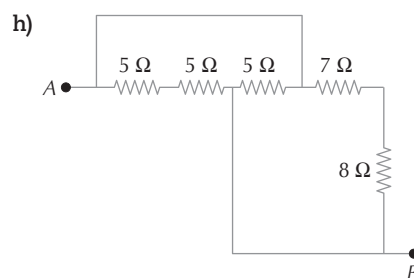
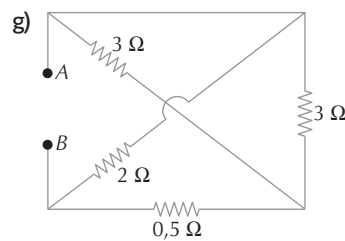
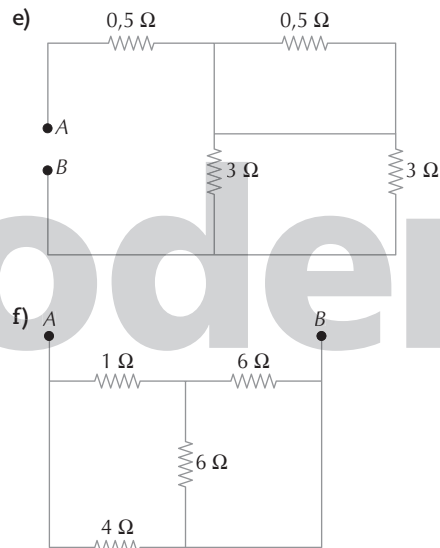
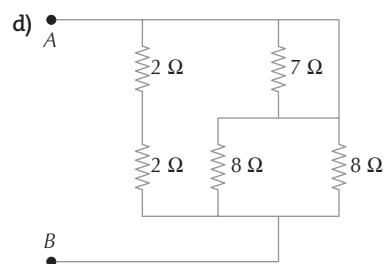
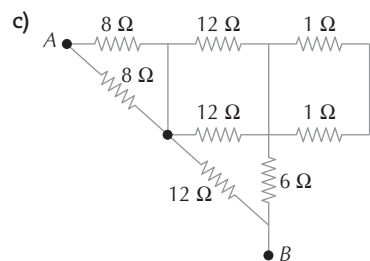
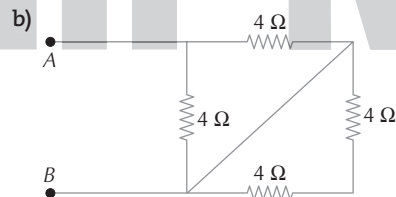
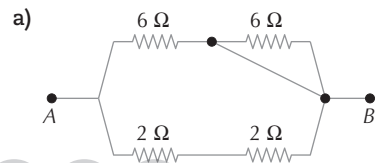
Conteúdo digital Moderna PLUS http://www.modernaplus.com.br
Atividade experimental: *Associação de lâmpadas*

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

P. 153 Considerando a associação da figura, responda:

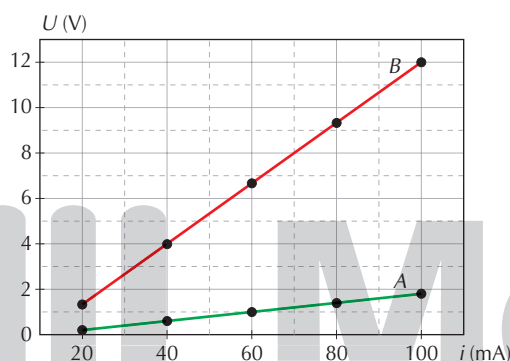
a) Qual é a resistência equivalente entre *A* e *B*?

b) Se for retirado o fio *CD*, qual a nova resistência equivalente?

P. 154 Calcule a resistência equivalente das associações esquematizadas abaixo entre os terminais A e B:

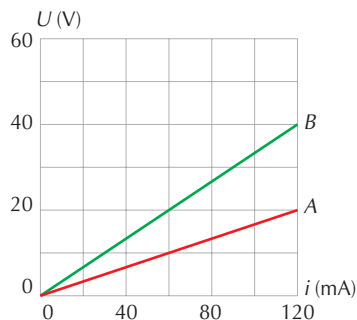
V3_P1_UN_B_CAP_07b.indd 172 17.09.09 18:02:39

P. 155 Um resistor de resistência elétrica R, submetido à ddp U, é percorrido por uma corrente elétrica. Associando-o em série com outro resistor de resistência $R' = 12\ \Omega$ e aplicando-se a essa associação a mesma ddp U, a intensidade da corrente elétrica cai a $\frac{1}{4}$ do valor anterior. Calcule o o valor da resistência R.

P. 156 Um ferro elétrico foi projetado para ser ligado a uma ddp de 110 V e dissipar a potência de 440 W. Para que possa ser utilizado sob a ddp de 220 V, é necessário, por exemplo, ligá-lo a um resistor em série. Calcule a resistência elétrica desse resistor adicional.

EXERCÍCIOS PROPOSTOS DE RECAPITULAÇÃO

P. 157 (UFSCar-SP) Numa experiência com dois resistores, R_1 e R_2, ligados em série e em paralelo, os valores obtidos para tensão e corrente estão mostrados nos gráficos.

a) Analisando os gráficos, qual deles corresponde à associação em série e à associação em paralelo dos resistores? Justifique sua resposta.

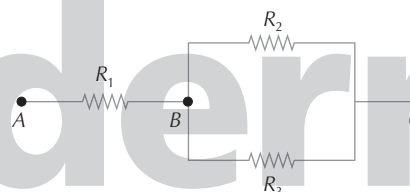
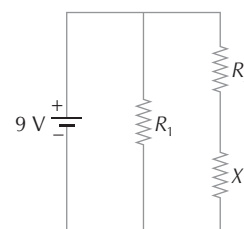
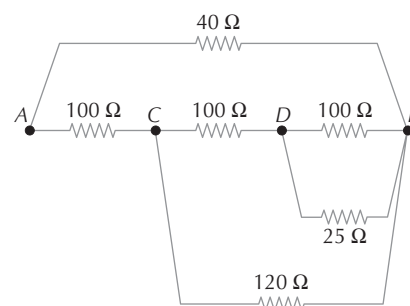
b) O coeficiente angular dos gráficos corresponde à resistência equivalente das associações em série e em paralelo. Considerando que o coeficiente angular do gráfico A seja 16,7 e do gráfico B seja 120, obtenha os valores das resistências de R_1 e de R_2.

P. 158 (PUC-SP) Foram realizados ensaios elétricos com dois resistores A e B. Cada um foi submetido a uma tensão elétrica contínua U, crescente, e mediu-se a correspondente corrente i. Os resultados estão representados no gráfico.

a) Mostre que os dois resistores obedecem à lei de Ohm. Qual a resistência de cada um, em quiloohm?

b) Construa os gráficos $U \times i$ correspondentes aos resistores R e S obtidos por associação de A e B em paralelo e em série, respectivamente.

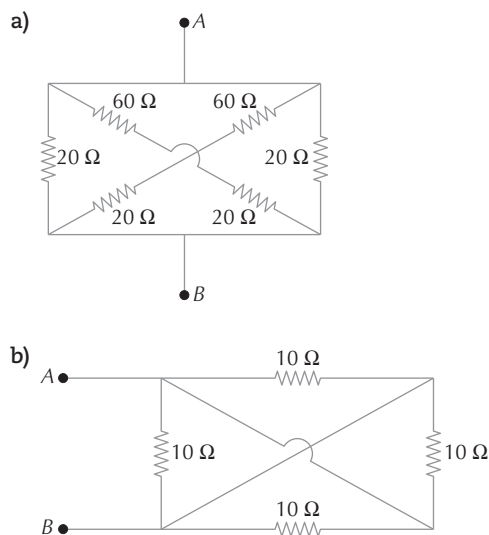
P. 159 (Ufal) Considere a associação de três resistores ôhmicos de resistências $R_1 = 6{,}8\ \Omega$, $R_2 = 4{,}0\ \Omega$ e $R_3 = 16\ \Omega$, como representa o esquema. Sabendo que a intensidade da corrente elétrica que passa por R_3 vale 2,0 A, determine:

a) a intensidade da corrente que passa por R_1;

b) a ddp entre os pontos A e C.

P. 160 (UFPE) No circuito esquematizado abaixo, $R_1 = R_2 = 2$ ohms e a corrente fornecida pela bateria é igual a 7,5 A. Calcule o valor da resistência X, em ohms.

P. 161 Para o circuito da figura, a ddp entre A e B vale 320 V. Calcule a ddp entre os pontos D e B.

P. 162 Nas associações seguintes aplica-se entre *A* e *B* a ddp de 100 V. Calcule a potência dissipada em cada associação.

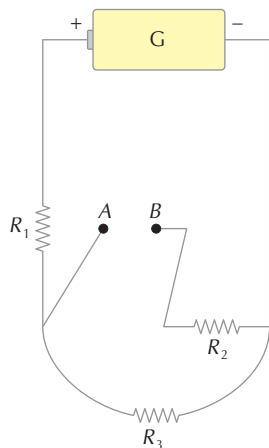
a)

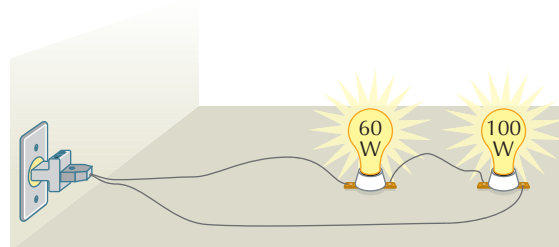
A; 60 Ω; 60 Ω; 20 Ω; 20 Ω; 20 Ω; 20 Ω; B

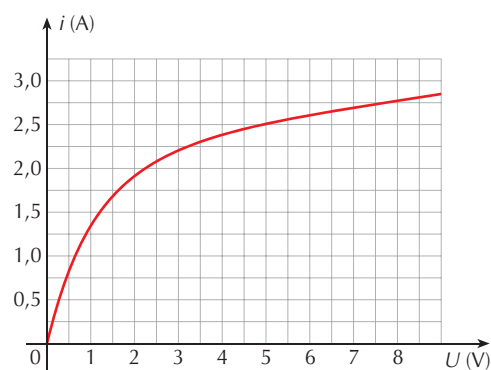
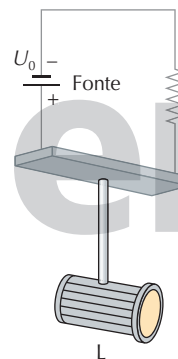
b)

P. 163 (Vunesp) Um estudante tem que usar três resistores de mesma resistência *R* e uma lâmpada para montar um circuito e ligá-lo aos terminais de uma fonte de tensão contínua de 20 V. Sabe-se que a lâmpada tem resistência de 5,0 Ω e potência de 5,0 W. Para R = 10 Ω, pede-se:

a) as possíveis diferentes associações dos três resistores que o estudante pode escolher e as resistências equivalentes $R_{eq.}$ para cada caso;

b) a associação de resistores mais adequada para que, quando ligada em série com a lâmpada, esta não queime e se mantenha acesa com o brilho mais intenso. Justifique.

P. 164 (UFBA) No circuito representado abaixo, os fios de ligação são ideais, a diferença de potencial fornecida pelo gerador G é igual a 20 V, e as resistências elétricas dos resistores ôhmicos R_1, R_2 e R_3 são, respectivamente, 2 Ω, 1 Ω e 14 Ω.

Determine o número de resistores de 2 Ω que devem ser associados em série, entre os pontos *A* e *B*, para que o resistor R_1 dissipe uma potência igual a 18 W.

P. 165 (PUC-RJ) A tomada de sua casa produz uma ddp de 120 V. Você vai ao supermercado e compra duas lâmpadas, uma de 60 W e outra de 100 W. Essas especificações correspondem à situação em que a lâmpada é conectada isoladamente à ddp considerada.

Você conecta as duas lâmpadas em série como mostrado na figura. Qual a que brilhará mais?

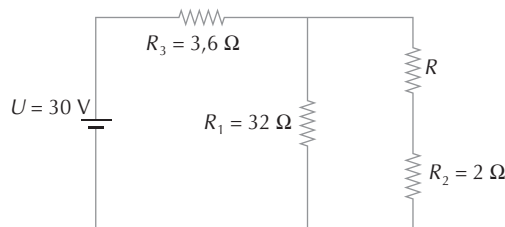
P. 166 (Fuvest-SP) Dispõe-se de uma lâmpada decorativa especial L, cuja curva característica, fornecida pelo manual do fabricante, é apresentada a seguir. Deseja-se ligar essa lâmpada em série com uma resistência R = 2,0 Ω, a uma fonte de tensão U_0, como no circuito abaixo. Por precaução, a potência dissipada na lâmpada deve ser igual à potência dissipada no resistor.

Para as condições acima:

a) Represente a curva característica *i versus U* do resistor na própria reprodução do gráfico fornecido pelo fabricante, identificando-a com a letra R.

b) Determine, utilizando o gráfico, a corrente i, em ampères, para que a potência dissipada na lâmpada e no resistor sejam iguais.

c) Determine a tensão U_0, em volts, que a fonte deve fornecer.

d) Determine a potência *Pot*, em watts, que a lâmpada dissipará nessas condições.

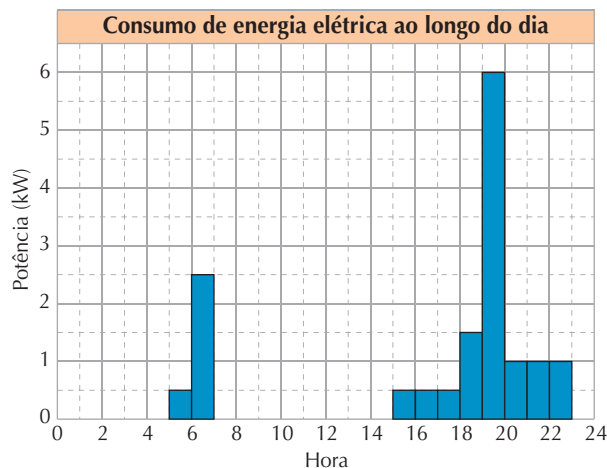
P. 167 (Fuvest-SP) O circuito abaixo é formado por quatro resistores e um gerador que fornece uma tensão constante $U = 30$ V. O valor da resistência do resistor R é desconhecido. Na figura estão indicados os valores das resistências dos outros resistores.

a) Determine o valor, em ohms, da resistência R para que as potências dissipadas em R_1 e R_2 sejam iguais.

b) Determine o valor, em watts, da potência Pot dissipada no resistor R_1, nas condições do item anterior.

P. 168 (Unicamp-SP) Um fusível é um interruptor elétrico de proteção que queima, desligando o circuito, quando a corrente ultrapassa certo valor. A rede elétrica de 110 V de uma casa é protegida por um fusível de 15 A. Dispõe-se dos seguintes equipamentos: um aquecedor de água de 2.200 W, um ferro de passar de 770 W e lâmpadas de 100 W.

a) Quais desses equipamentos podem ser ligados na rede elétrica, **um de cada vez**, sem queimar o fusível?

b) Se apenas lâmpadas de 100 W são ligadas na rede elétrica, qual o número máximo dessas lâmpadas que podem ser ligadas simultaneamente sem queimar o fusível de 15 A?

P. 169 (Unicamp-SP) O gráfico a seguir mostra a potência elétrica (em kW) consumida em uma certa residência ao longo do dia. A residência é alimentada com a voltagem de 120 V. Essa residência tem um fusível que queima se a corrente ultrapassar um certo valor, para evitar danos na instalação elétrica. Por outro lado, esse fusível deve suportar a corrente utilizada na operação normal dos aparelhos da residência.

a) Qual o valor mínimo da corrente que o fusível deve suportar?

b) Qual é a energia em kWh consumida em um dia nessa residência?

c) Qual será o preço a pagar por 30 dias de consumo se o kWh custa R$ 0,12?

P. 170 (UFC-CE) Um fogareiro elétrico é constituído de três resistores elétricos, todos de mesma resistência R, que podem ser convenientemente associados, em paralelo ou em série. Em ambos os casos, a energia elétrica do fogareiro é fornecida por uma bateria que mantém entre seus terminais uma tensão constante. Se os resistores, associados em paralelo, são capazes de fazer ferver uma dada quantidade de água em 7 minutos, determine o tempo necessário para fazer ferver essa mesma quantidade de água, caso os resistores sejam associados em série.

TESTES PROPOSTOS

T. 146 (Vunesp) Um circuito elétrico é composto por lâmpadas de 5 V ligadas em série a uma fonte de 220 V. Para que não se queimem, o número mínimo de lâmpadas nesse circuito deve ser:

a) 24 b) 44 c) 54 d) 64 e) 74

T. 147 (Mackenzie-SP) Observa-se que um resistor de resistência R, quando submetido à ddp U, é percorrido pela corrente elétrica de intensidade i. Associando-se em série, a esse resistor, outro de resistência 12 Ω, e submetendo-se a associação à mesma ddp U, a corrente elétrica que a atravessa tem intensidade $\frac{i}{4}$. O valor da resistência R é:

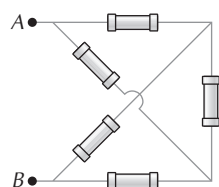
a) 2 Ω
b) 4 Ω
c) 6 Ω
d) 10 Ω
e) 12 Ω

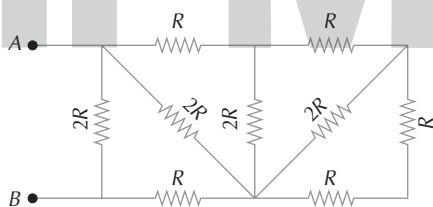
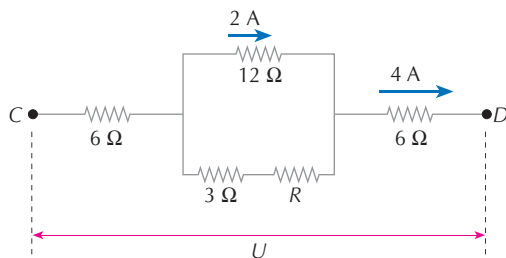
T. 148 (Unifesp) Por falta de tomadas extras em seu quarto, um jovem utiliza um benjamim (multiplicador de tomadas) com o qual, em vez de um aparelho, ele poderá conectar à rede elétrica três aparelhos simultaneamente. Ao se conectar o primeiro aparelho, com resistência elétrica R, sabe-se que a corrente na rede é I. Ao se conectarem os outros dois aparelhos, que possuem resistências $\frac{R}{2}$ e $\frac{R}{4}$, respectivamente, e considerando constante a tensão da rede elétrica, a corrente total passará a ser:

a) $\frac{17 \cdot I}{12}$
b) $3 \cdot I$
c) $7 \cdot I$
d) $9 \cdot I$
e) $11 \cdot I$

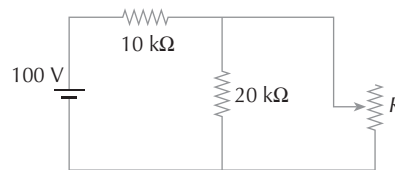
T. 149 (UFTM-MG) É comum, em circuitos elétricos, que um fio passe sobre o outro sem que haja contato elétrico, sendo a indicação dessa situação, no esquema elétrico do circuito, dada por um pequeno arco no ponto em que haverá sobreposição. Utilizando resistores de 100 Ω, o professor desejava que seus alunos montassem o circuito indicado a seguir e posteriormente medissem, com seus ohmímetros, o valor da resistência equivalente entre os pontos *A* e *B*. Um aluno desatento, interpretando erradamente o salto de um fio sobre o outro, montou seu circuito unindo os dois fios em um ponto comum. Como consequência, a resistência equivalente de seu circuito, em Ω, resultou:

a) 25
b) 50
c) 100
d) 200
e) 5000

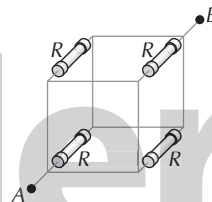
Circuito proposto aos alunos

T. 150 (Mackenzie-SP) A resistência elétrica do resistor equivalente da associação da figura, entre os pontos *A* e *B*, é:

a) 2R
b) R
c) $\frac{R}{2}$
d) $\frac{R}{3}$
e) $\frac{R}{4}$

T. 151 (Fatec-SP) No circuito elétrico representado no esquema a seguir, a corrente no resistor de 6 Ω é de 4 A e no de 12 Ω é de 2 A.

Nessas condições, a resistência do resistor *R* e a tensão *U* aplicada entre os pontos *C* e *D* valem, respectivamente:

a) 6 Ω e 42 V
b) 2 Ω e 36 V
c) 12 Ω e 18 V
d) 8 Ω e 5 V
e) 9 Ω e 72 V

T. 152 (PUC-RS) Responda à questão a partir da análise do circuito abaixo, em que *R* representa a resistência elétrica de um reostato que pode ser regulada para assumir valores entre 0 e um valor máximo de 20 kΩ.

Considerando uma variação da resistência *R* entre os seus limites, as intensidades máxima e mínima da corrente elétrica que passa no resistor de 10 kΩ são, respectivamente:

a) 0,8 mA e 2,0 mA
b) 8,0 mA e 4,0 mA
c) 8,0 mA e 5,0 mA
d) 10 mA e 2,5 mA
e) 10 mA e 5,0 mA

T. 153 (Fuvest-SP) Considere um circuito formado por 4 resistores iguais, interligados por fios perfeitamente condutores. Cada resistor tem resistência *R* e ocupa uma das arestas de um cubo, como mostra a figura.

Aplicando entre os pontos *A* e *B* uma diferença de potencial *V*, a corrente que circulará entre *A* e *B* vale:

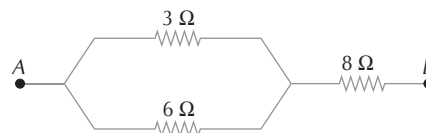
a) $\frac{4V}{R}$

b) $\frac{2V}{R}$

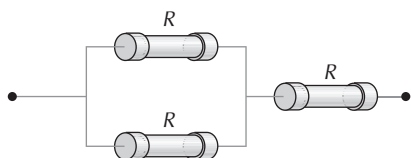
c) $\frac{V}{R}$

d) $\frac{V}{2R}$

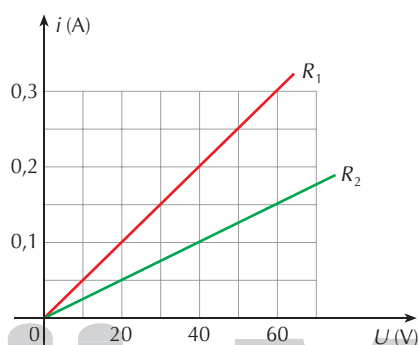
e) $\frac{V}{4R}$

T. 154 (Mackenzie-SP) No trecho de circuito visto na figura, a resistência de 3 Ω dissipa 27 W.

A ddp entre os pontos *A* e *B* vale:

a) 9 V
b) 13,5 V
c) 25,5 V
d) 30 V
e) 45 V

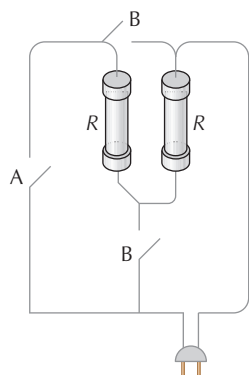
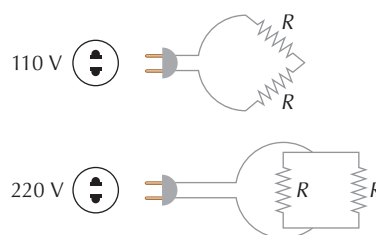
T. 155 (UFC-CE) No circuito abaixo, os três resistores são idênticos e cada um pode dissipar uma potência máxima de 32 W, sem haver superaquecimento.

Nessa condição, qual a potência máxima, em watts, que o circuito poderá dissipar?

a) 32
b) 36
c) 40
d) 44
e) 48

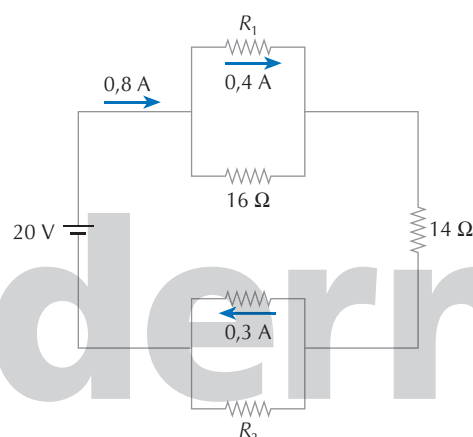
T. 156 (UFRGS-RS) O gráfico representa a corrente elétrica *i* em função da diferença de potencial *U* aplicada aos extremos de dois resistores R_1 e R_2.

Quando R_1 e R_2 forem ligados em paralelo a uma diferença de potencial de 40 V, qual a potência dissipada nessa associação?

a) 2,7 W
b) 4,0 W
c) 12 W
d) 53 W
e) 24.000 W

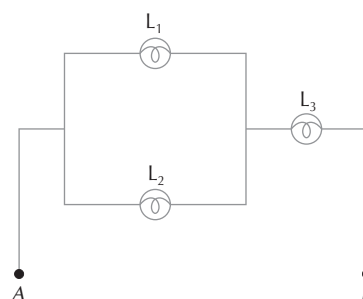
T. 157 (Fuvest-SP) Um aquecedor elétrico é formado por duas resistências elétricas R iguais. Nesse aparelho, é possível escolher entre operar em redes de 110 V (chaves B fechadas e chave A aberta) ou redes de 220 V (chave A fechada e chaves B abertas). Chamando as potências dissipadas por esse aquecedor de $P_{(220)}$ e $P_{(110)}$, quando operando, respectivamente, em 220 V e 110 V, verifica-se que as potências dissipadas são tais que:

a) $P_{(220)} = \frac{1}{2} \cdot P_{(110)}$
b) $P_{(220)} = P_{(110)}$
c) $P_{(220)} = \frac{3}{2} \cdot P_{(110)}$
d) $P_{(220)} = 2 \cdot P_{(110)}$
e) $P_{(220)} = 4 \cdot P_{(110)}$

T. 158 (Vunesp) Dois resistores iguais estão ligados em série a uma tomada de 110 V e dissipam ao todo 550 W. Observe as figuras a seguir.

A potência total dissipada por esses mesmos resistores, se são ligados em paralelo a uma tomada de 220 V, é igual a:

a) 550 W
b) 4.400 W
c) 1.100 W
d) 2.200 W
e) 8.800 W

T. 159 (Olimpíada Brasileira de Física) Seja o circuito representado na figura abaixo.

A potência dissipada pelo resistor R_2 é de:

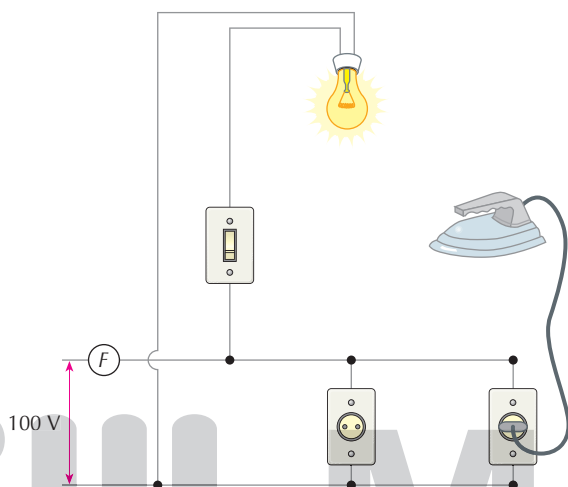
a) 4,8 watts
b) 2,4 watts
c) 1,92 watts
d) 0,72 watts
e) 1,2 watts

T. 160 (Mackenzie-SP) Três lâmpadas, L_1, L_2 e L_3, identificadas, respectivamente, pelas inscrições (2 W — 12 V), (4 W — 12 V) e (6 W — 12 V), foram associadas conforme mostra o trecho de circuito abaixo. Entre os terminais A e B aplica-se a ddp de 12 V.

A intensidade de corrente elétrica que passa pela lâmpada L_3 é:

a) $2,5 \cdot 10^{-1}$ A
b) $3,3 \cdot 10^{-1}$ A
c) 1,0 A
d) 1,6 A
e) 2,0 A

T. 161 (Ufes) Duas lâmpadas de mesma resistência são ligadas em série e o conjunto é submetido a uma tensão *U*. Nessa configuração, o conjunto dissipa uma potência total P_s = 200 W. Se essas mesmas lâmpadas forem ligadas em paralelo e o conjunto submetido à mesma tensão *U*, a potência total P_p dissipada pelo conjunto será de:

a) 100 W
b) 200 W
c) 400 W
d) 600 W
e) 800 W

T. 162 (Fuvest-SP) Um circuito doméstico simples, ligado à rede de 110 V e protegido por um fusível *F* de 15 A, está esquematizado abaixo.

A potência máxima de um ferro de passar roupa, que pode ser ligado, simultaneamente, a uma lâmpada de 150 W, sem que o fusível interrompa o circuito, é aproximadamente de:

a) 1.100 W
b) 1.500 W
c) 1.650 W
d) 2.250 W
e) 2.500 W

T. 163 (UEL-PR) Num chuveiro elétrico há, de modo geral, dois resistores internos iguais que podem ser usados isoladamente, em série ou em paralelo, resultando em diferentes níveis de aquecimento. Além disso, a potência dissipada num resistor é diretamente proporcional ao quadrado da tensão elétrica aplicada e inversamente proporcional à sua resistência. Considerando que a tensão elétrica a que está submetido o chuveiro não pode ser variada, é correto afirmar:

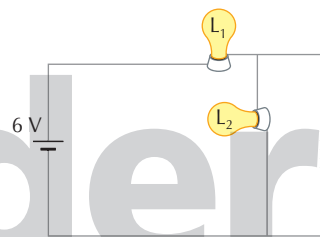
a) O menor aquecimento corresponde à situação na qual a corrente elétrica passa por apenas um resistor.
b) O aquecimento intermediário corresponde à situação na qual a corrente elétrica passa por uma associação em série dos dois resistores.
c) O maior aquecimento corresponde à situação na qual a corrente elétrica passa por uma associação em paralelo dos dois resistores.
d) O aquecimento intermediário corresponde à situação na qual a corrente elétrica passa por uma associação em paralelo dos dois resistores.
e) O maior aquecimento corresponde à situação na qual a corrente elétrica passa por uma associação em série dos dois resistores.

T. 164 (Mackenzie-SP) Um chuveiro elétrico apresenta a inscrição:

2.200 W (Verão)/4.400 W (Inverno) — 220 V

e, ligado corretamente, está protegido, na rede que o alimenta, por um fusível com tolerância de até 30 A. Se ligarmos, em paralelo ao chuveiro, sob a mesma ddp de 220 V, uma torneira elétrica com a inscrição 2.000 W — 220 V, poderemos afirmar que:

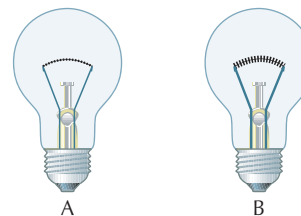
a) o fusível queimará somente se o chuveiro estiver ligado no "Verão".
b) o fusível queimará somente se o chuveiro estiver ligado no "Inverno".
c) o fusível queimará de qualquer forma, ou seja, tanto se o chuveiro estiver ligado no "Verão" como no "Inverno".
d) o fusível não queimará de maneira alguma.
e) o fusível queimará mesmo sem ser ligada a torneira.

T. 165 (Fuvest-SP) Um circuito é formado de duas lâmpadas L_1 e L_2, uma fonte de 6 V e uma resistência *R*, conforme desenhado na figura.

As lâmpadas estão acesas e funcionando em seus valores nominais (L_1: 0,6 W e 3 V e L_2: 0,3 W e 3 V). O valor da resistência *R* é:

a) 15 Ω
b) 20 Ω
c) 25 Ω
d) 30 Ω
e) 45 Ω

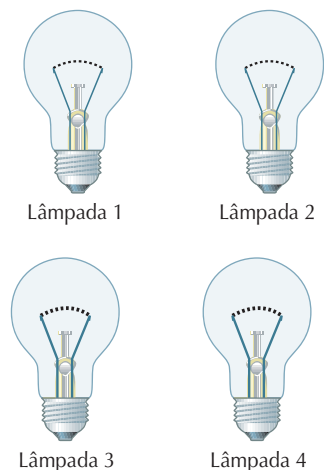
T. 166 (PUC-RJ) Considere duas lâmpadas, A e B, idênticas a não ser pelo fato de que o filamento de B é mais grosso que o filamento de A.

A

B

Se cada uma estiver sujeita a uma ddp de 110 volts:

a) A será a mais brilhante, pois tem a maior resistência.
b) B será a mais brilhante, pois tem a maior resistência.
c) A será a mais brilhante, pois tem a menor resistência.
d) B será a mais brilhante, pois tem a menor resistência.
e) ambas terão o mesmo brilho.

T. 167 (FGV-SP) Uma fábrica de lâmpadas utiliza a mesma liga de tungstênio para produzir o filamento de quatro modelos de lâmpadas para tensão de 127 V.

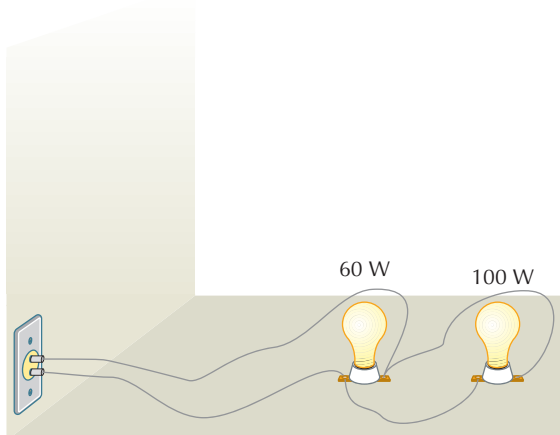
Lâmpada 1 Lâmpada 2

Lâmpada 3 Lâmpada 4

Os modelos diferenciam-se entre si pelo comprimento e área da seção transversal do filamento, conforme indicado na tabela a seguir.

Modelo	Comprimento	Área de seção transversal
lâmpada 1	L	S
lâmpada 2	L	$2S$
lâmpada 3	$2L$	S
lâmpada 4	$2L$	$2S$

Quando ligadas em paralelo a uma mesma fonte de tensão de 127 V, as potências P_1, P_2, P_3 e P_4 das respectivas lâmpadas guardam a relação

a) $P_1 > P_2 > P_3 > P_4$
b) $P_4 > P_3 > P_2 > P_1$
c) $P_1 = P_2 > P_3 > P_4$
d) $P_3 > P_4 > P_1 > P_2$
e) $P_2 > P_1 = P_4 > P_3$

T. 168 (UFT-TO) Duas lâmpadas — uma de 60 W e a outra de 100 W, ambas especificadas para 220 V — estão ligadas a uma tomada, como mostrado na figura.

Com base nessas informações, julgue os itens seguintes.

(01) A resistência elétrica da lâmpada de 60 W é maior que a da lâmpada de 100 W.
(02) A corrente elétrica na lâmpada de 60 W é maior que na lâmpada de 100 W.
(04) Se a lâmpada de 60 W se queimar, a corrente na lâmpada de 100 W aumentará.
(08) Se a lâmpada de 60 W se queimar, a corrente nos fios da tomada permanecerá a mesma.
(16) Uma lâmpada de 100 W, especificada para 120 V, consome mais energia elétrica que uma de 100 W, especificada para 220 V, ligadas durante o mesmo intervalo de tempo.

Dê como resposta a soma dos números que precedem as afirmações corretas.

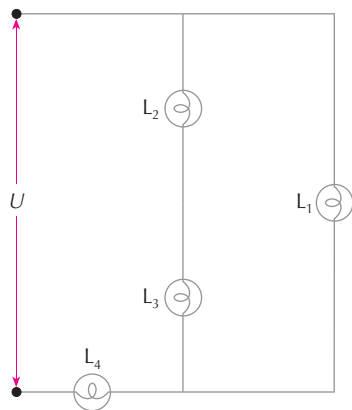
T. 169 (Enem-MEC) Lâmpadas incandescentes são normalmente projetadas para trabalhar com a tensão da rede elétrica em que serão ligadas. Em 1997, contudo, lâmpadas projetadas para funcionar com 127 V foram retiradas do mercado e, em seu lugar, colocaram-se lâmpadas concebidas para uma tensão de 120 V. Segundo dados recentes, essa substituição representou uma mudança significativa no consumo de energia elétrica para cerca de 80 milhões de brasileiros que residem nas regiões em que a tensão da rede é de 127 V.

A tabela abaixo apresenta algumas características de duas lâmpadas de 60 W, projetadas respectivamente para 127 V (antiga) e 120 V (nova), quando ambas encontram-se ligadas numa rede de 127 V.

Lâmpada (projeto original)	60 W – 127 V	60 W – 120 V
Tensão da rede elétrica (V)	127	127
Potência medida (W)	60	65
Luminosidade medida (lumens)	750	920
Vida útil média (horas)	1.000	452

Acender uma lâmpada de 60 W e 120 V em um local onde a tensão na tomada é de 127 V, comparativamente a uma lâmpada de 60 W e 127 V no mesmo local tem como resultado:

a) mesma potência, maior intensidade de luz e maior durabilidade.
b) mesma potência, maior intensidade de luz e menor durabilidade.
c) maior potência, maior intensidade de luz e maior durabilidade.
d) maior potência, maior intensidade de luz e menor durabilidade.
e) menor potência, menor intensidade de luz e menor durabilidade.

T. 170 (UFMA) Na associação de lâmpadas abaixo, todas elas são iguais.

Podemos afirmar, corretamente, que:

a) nenhuma das lâmpadas tem brilho igual.
b) a lâmpada L_1 brilha mais que todas as outras.
c) todas as lâmpadas têm o mesmo brilho.
d) as lâmpadas L_1, L_2 e L_3 têm o mesmo brilho.
e) a lâmpada L_1 brilha mais que a L_2.

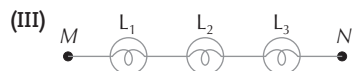
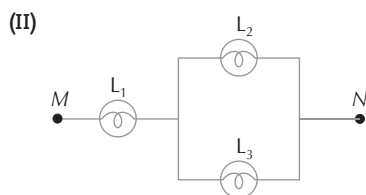
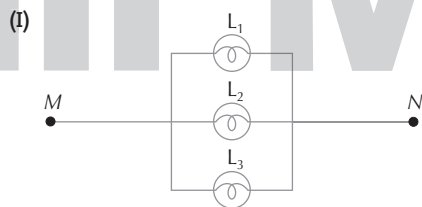
T. 171 (F. M. Vassouras-RJ) Três lâmpadas:

L_1 de 20 W — 110 V
L_2 de 100 W — 110 V
L_3 de 500 W — 110 V

são conectadas de três formas diferentes, conforme é mostrado nos esquemas I, II e III.

(I)

(II)

(III)

Em cada caso, o circuito assim formado é ligado à rede (110 V) por seus terminais livres (M e N). Qual das opções abaixo indica corretamente a lâmpada de maior brilho em cada uma dessas três ligações?

	(I)	(II)	(III)
a)	L_1	L_1	L_3
b)	L_1	L_2	L_3
c)	L_3	L_1	L_1
d)	L_3	L_2	L_1
e)	L_3	L_3	L_3

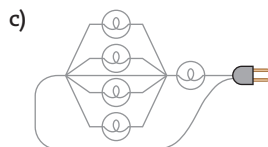
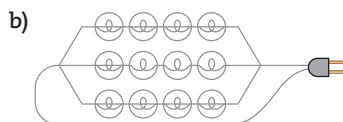
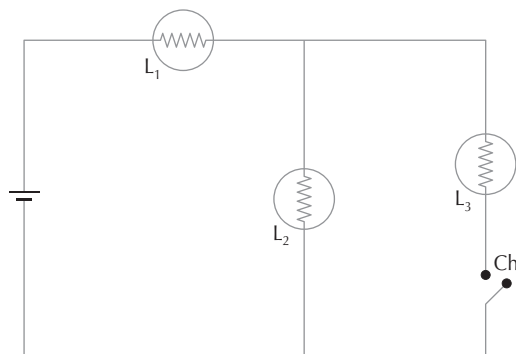
T. 172 (UFV-MG) Em alguns circuitos de iluminação de árvores de Natal, possuindo lâmpadas de mesmas resistências, observa-se que, quando uma lâmpada "queima", um segmento apaga, enquanto outros segmentos continuam normalmente acesos. Além disso, mesmo com alguma lâmpada "queimada", as lâmpadas acesas devem estar submetidas a uma mesma diferença de potencial, a fim de apresentarem a mesma luminosidade. Pode-se então afirmar que, dos diagramas abaixo ilustrados, o que melhor representa esse tipo de circuito de iluminação é:

a)

b)

c)

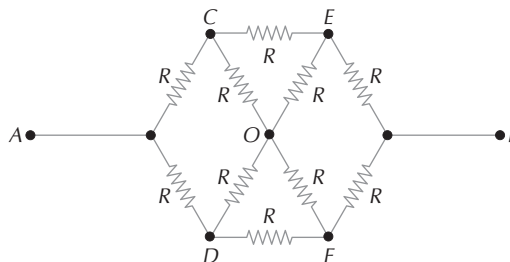
d)

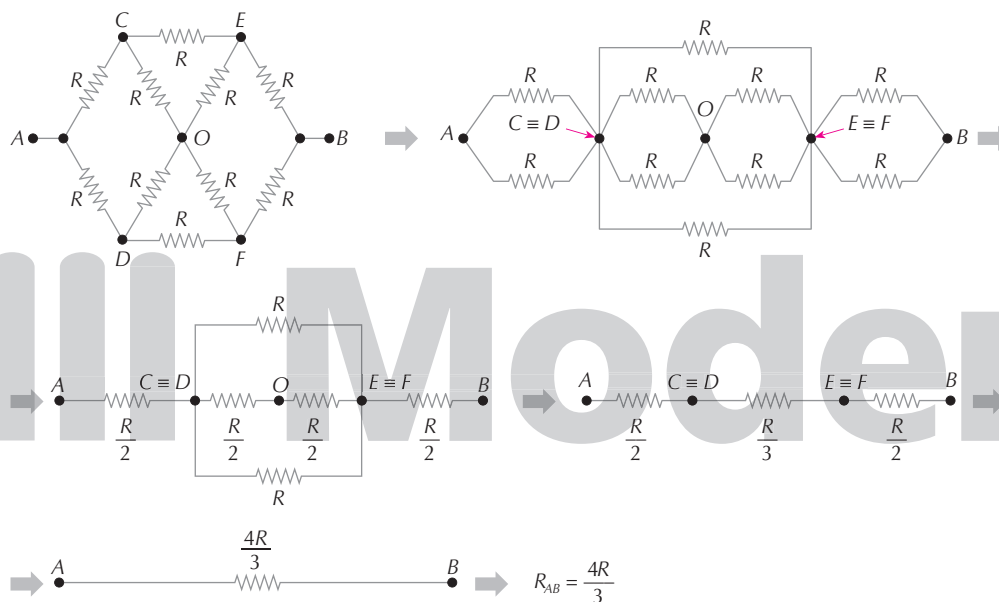
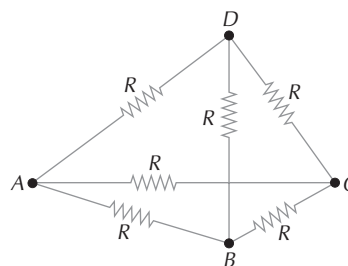
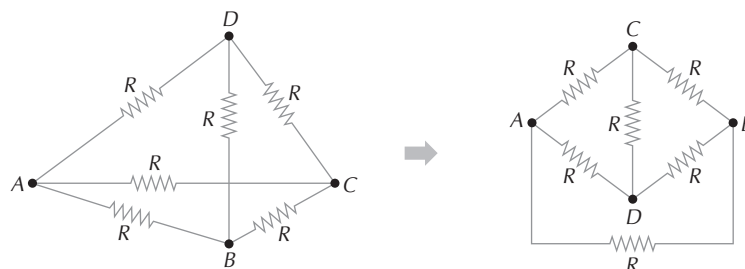
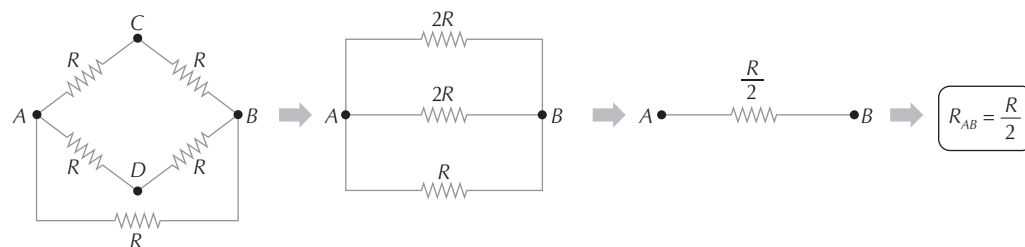
e)

T. 173 (UCSal-BA) O circuito esquematizado abaixo compreende um gerador, três lâmpadas iguais L_1, L_2 e L_3 e uma chave interruptora Ch.

Com a chave Ch aberta, as lâmpadas L_1 e L_2 ficam acesas apresentando brilhos normais. Ao fechar a chave, observa-se que:

a) os brilhos de L_1 e L_2 aumentam.
b) os brilhos de L_1 e L_2 diminuem.
c) os brilhos de L_1, L_2 e L_3 apresentam-se normais.
d) o brilho de L_1 aumenta e o de L_2 diminui.
e) o brilho de L_2 aumenta e o de L_1 diminui.

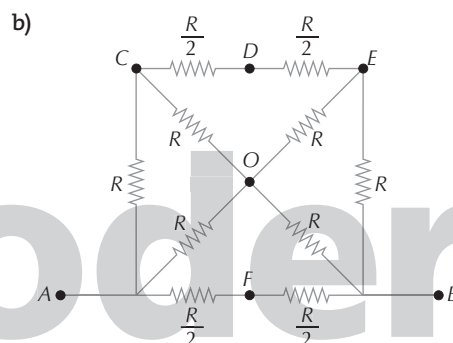
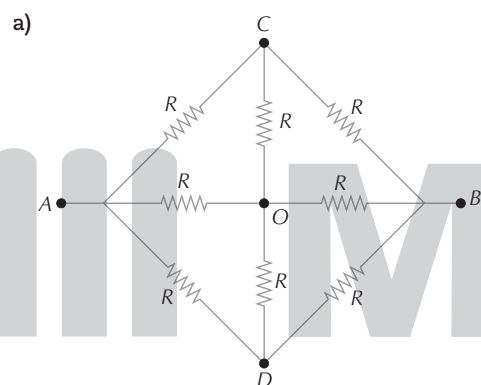
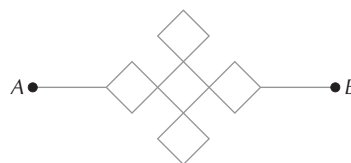
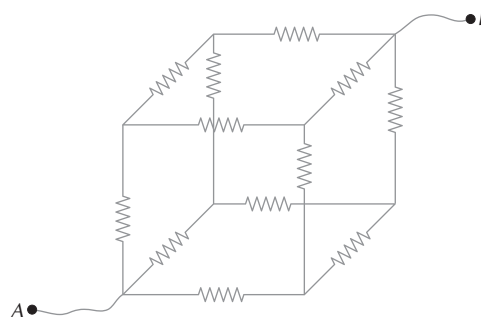
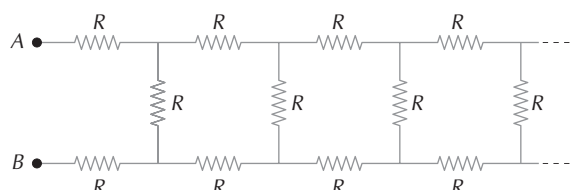
EXERCÍCIOS ESPECIAIS de associação de resistores

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

R. 69 Determine a resistência equivalente, entre os terminais A e B, do circuito da figura. Todos os resistores têm resistências iguais a R.

Solução:
Observando a **simetria** do circuito, concluímos que os pontos C e D possuem mesmo potencial elétrico e podem ser considerados coincidentes. O mesmo ocorre entre os pontos E e F. Assim, temos:

Resposta: $\frac{4R}{3}$

R. 70 Determine a resistência equivalente, entre os terminais A e B, do tetraedro ABCD. Os lados do tetraedro são constituídos por resistores de mesma resistência R.

Solução:
Vamos, inicialmente, colocar todos os resistores num mesmo plano:

Por simetria, concluímos que os pontos C e D possuem o mesmo potencial. Desse modo, o resistor que está entre os pontos C e D não é percorrido por corrente elétrica, podendo ser retirado do circuito. Assim, temos:

Resposta: $\frac{R}{2}$

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

P. 171 Determine a resistência equivalente, entre os terminais A e B, dos circuitos abaixo:

P. 172 (Mackenzie-SP) A figura mostra cinco quadrados, com lados de 10 cm cada um, construídos com fio de resistividade $1\ \mu\Omega \cdot m$ e seção transversal de $0,2\ mm^2$. Determine a resistência equivalente entre os pontos A e B.

P. 173 Os doze resistores da figura possuem a mesma resistência elétrica R e ocupam as arestas de um cubo. Qual a resistência elétrica equivalente entre os terminais A e B?

P. 174 A associação esquematizada é constituída de um número infinito de resistores idênticos, cada um de resistência elétrica R. Determine, em função de R, a resistência equivalente entre os terminais A e B.

UNIDADE B

Capítulo

Medidas elétricas

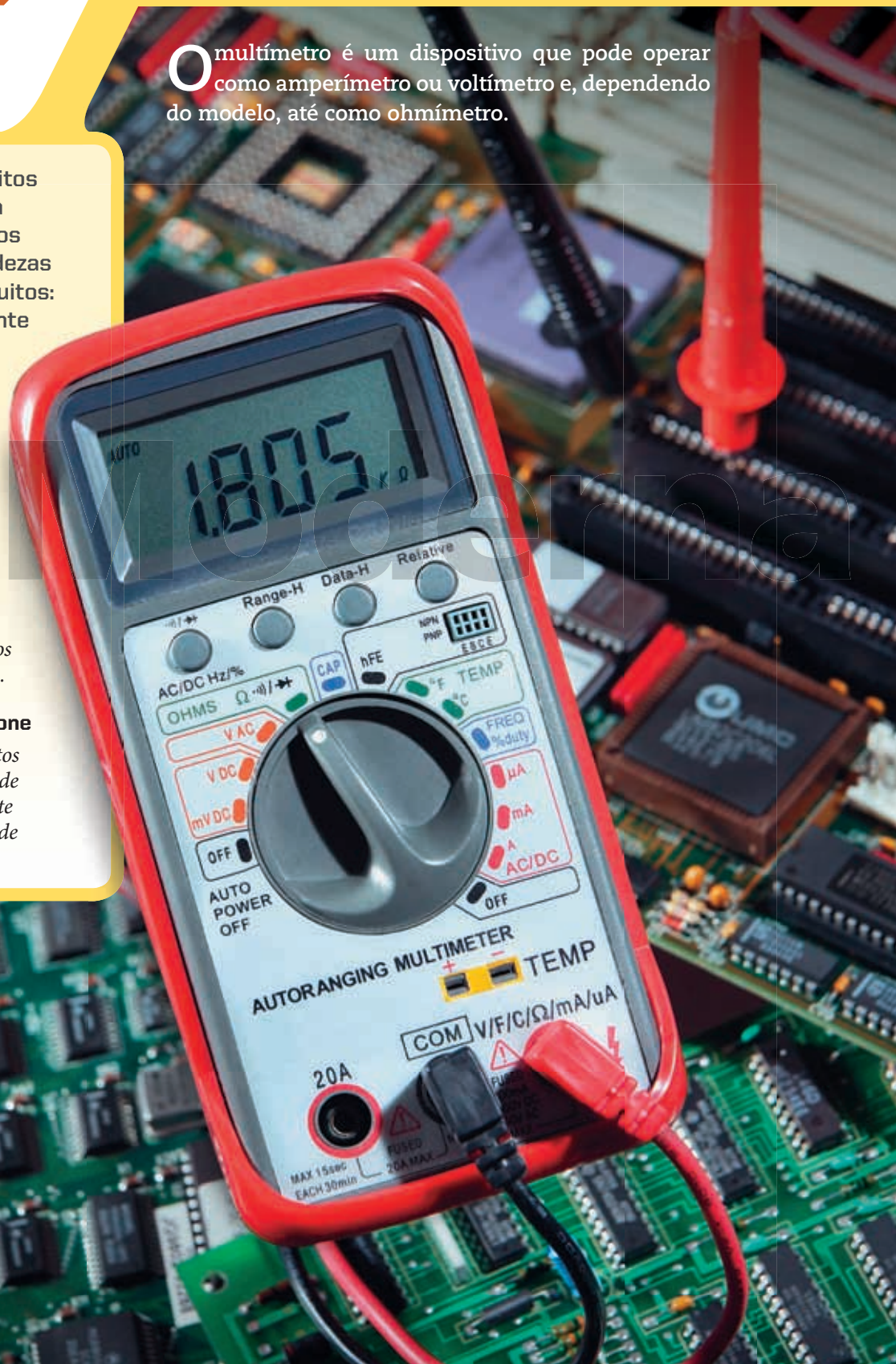
O multímetro é um dispositivo que pode operar como amperímetro ou voltímetro e, dependendo do modelo, até como ohmímetro.

Ao trabalhar com circuitos elétricos, é frequente a necessidade de medir os valores de várias grandezas envolvidas nesses circuitos: a intensidade da corrente elétrica, a diferença de potencial e a resistência elétrica de resistores.

8.1 O galvanômetro

O galvanômetro é o aparelho básico para a realização de medidas em circuitos elétricos. Os amperímetros e voltímetros são construídos a partir de galvanômetros.

8.2 Ponte de Wheatstone

Os ohmímetros são circuitos utilizados para a medida de resistência elétrica. A ponte de Wheatstone é um tipo de ohmímetro.

Seção 8.1

O galvanômetro

Objetivos

- Analisar os métodos usuais para medir intensidade de corrente elétrica e ddp.
- Conhecer o funcionamento dos galvanômetros, dos amperímetros e dos voltímetros.

Termos e conceitos

- corrente de fundo de escala
- *shunt*
- resistência multiplicadora
- amperímetro ideal
- voltímetro ideal

O aparelho básico das medidas em circuitos elétricos é o **galvanômetro**. Seu funcionamento baseia-se nos efeitos da corrente elétrica; os mais comuns funcionam segundo o efeito magnético da corrente elétrica, que veremos no Eletromagnetismo.

Na **figura 1**, a corrente elétrica de intensidade i, percorrendo um condutor dentro de um campo magnético, causado pelo ímã N – S, origina forças. Estas, agindo sobre um sistema móvel, deslocam um ponteiro sobre uma escala graduada. O **valor máximo da intensidade de corrente elétrica** que percorre o galvanômetro é denominado **corrente de fundo de escala**. Os galvanômetros medem correntes elétricas de pequena intensidade. Na **figura 1**, a corrente de fundo de escala vale 50 mA. Os aparelhos capazes de medir intensidades de corrente elétrica maiores denominam-se **amperímetros**. Do ponto de vista da Eletrodinâmica, esses aparelhos comportam-se como resistores.

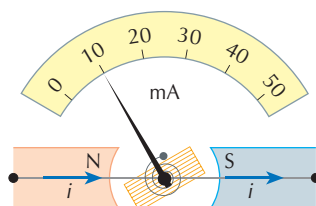



Figura 1. Os galvanômetros funcionam com base no efeito magnético da corrente.

Galvanômetro.

1 Amperímetros

Num galvanômetro, pequenas intensidades de corrente elétrica são suficientes para que o ponteiro se desloque do zero à outra extremidade da graduação (fundo de escala). O aparelho será danificado se a corrente elétrica tiver intensidade maior que o valor do fundo de escala. Por exemplo, o galvanômetro da **figura 1** não pode medir correntes de intensidade superior a 50 mA.

Para **que possa medir correntes elétricas mais intensas**, o galvanômetro (de resistência R_g) deve ser associado a um resistor de pequena resistência elétrica R_s denominado ***shunt****, em paralelo, conforme a **figura 2**. Assim, grande parte da corrente elétrica I que se quer medir desvia-se para o *shunt*, não danificando o aparelho.

O conjunto constituído pelo galvanômetro de resistência elétrica R_g e o *shunt* é um **amperímetro**. A resistência elétrica do amperímetro é $R_A = \dfrac{R_g R_s}{R_g + R_s}$ e a ddp em seus terminais é $V_A - V_B = R_A \cdot I$.

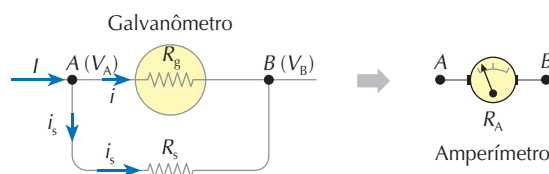



Figura 2.

* *Shunt* (em inglês) = desvio.

Por exemplo, se a intensidade de corrente elétrica a ser medida é $I = 5{,}0$ A e a intensidade de corrente de fundo de escala do galvanômetro é $i = 50$ mA $= 0{,}050$ A, deve-se escolher um *shunt* tal que no galvanômetro só passe 0,050 A.

Pelo *shunt* passa a corrente $i_s = I - i = 5{,}0\ \text{A} - 0{,}050\ \text{A} = 4{,}95\ \text{A}$.

Podemos, então, obter o **fator de multiplicação do *shunt***, indicado por n, pela relação:

$$\frac{I}{i} = n$$

No exemplo:

$$n = \frac{I}{i} = \frac{5{,}0}{0{,}050} = 100$$

Na prática, esse fator pode ser obtido em função de R_g e R_s, como segue. Estando o galvanômetro de resistência elétrica R_g em paralelo com o *shunt*, temos:

$$V_A - V_B = R_g \cdot i = R_s \cdot i_s \Rightarrow R_g \cdot i = R_s(I - i) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow I - i = \frac{R_g \cdot i}{R_s} \Rightarrow I = i \cdot \left(1 + \frac{R_g}{R_s}\right) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{I}{i} = 1 + \frac{R_g}{R_s} \Rightarrow \boxed{n = 1 + \frac{R_g}{R_s}}$$

No exemplo, $n = 100$ e, portanto, $\frac{R_g}{R_s} = 99$, isto é, a resistência elétrica do *shunt* é $\frac{1}{99}$ da resistência elétrica do galvanômetro.

Um mesmo amperímetro pode ser dotado de um jogo de *shunts* convenientes e servir para várias escalas de intensidade de corrente elétrica. A escala variará de acordo com o valor da resistência do *shunt*.

Na **figura 3**, o amperímetro consta de vários *shunts* e de uma chave, que pode ser colocada em três valores para o fator de multiplicação dos *shunts*. Com a chave no fator 10, estaremos utilizando a escala de 0 A a 30 A. Consegue-se, então, medir diversas intensidades de corrente elétrica com um único amperímetro.

Figura 3. Amperímetro de escala múltipla.

Os amperímetros devem ser colocados em série no ramo onde se pretende medir a intensidade de corrente elétrica (fig. 4). Ocorre que, funcionando como um resistor, o circuito irá modificar-se e a corrente elétrica não será igual àquela antes da introdução do amperímetro. Para reduzir ao mínimo essas modificações, a resistência elétrica do amperímetro deve ser pequena em relação às resistências do circuito.

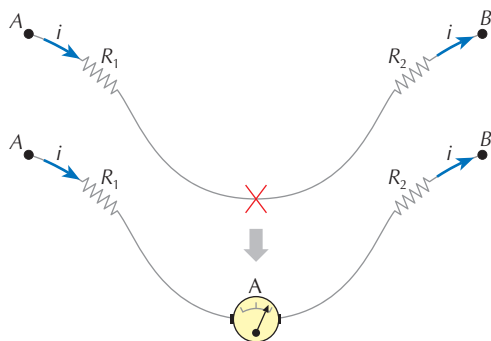



Figura 4. Para medir a intensidade da corrente elétrica *i* no ramo *AB*, deve-se colocar o amperímetro em série no ramo, de modo que seja atravessado pela corrente *i*.

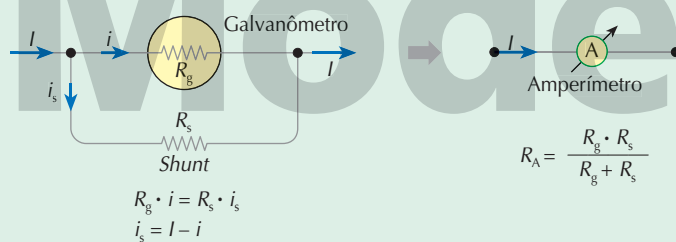
Amperímetro ideal é aquele cuja resistência elétrica é nula.

Quando a resistência elétrica do amperímetro é pequena em relação às resistências do circuito, o amperímetro é considerado ideal.

Resumindo:

Um **amperímetro** é, portanto, um aparelho constituído por um galvanômetro ao qual se associa em paralelo um resistor de resistência elétrica baixa R_s, denominado ***shunt***.

$R_g \cdot i = R_s \cdot i_s$

$i_s = I - i$

$R_A = \dfrac{R_g \cdot R_s}{R_g + R_s}$

O amperímetro é **colocado em série** com o elemento de circuito cuja intensidade de corrente elétrica se quer medir.

2 Voltímetros

O **voltímetro**, aparelho utilizado para medir ddp, é construído associando-se em série a um galvanômetro um resistor de resistência elevada R_M, denominado **multiplicador**, conforme mostra a **figura 5**.

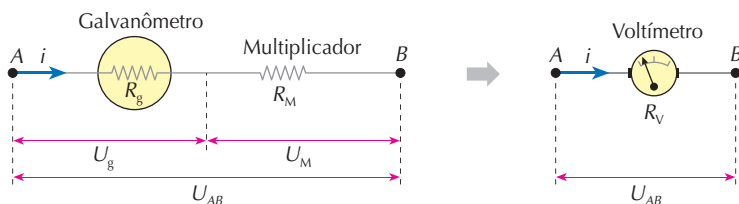



Figura 5. A faixa de medição do galvanômetro é ampliada com a associação da resistência multiplicadora.

A resistência elétrica do voltímetro é $R_v = R_g + R_M$.

Estando o galvanômetro e o multiplicador em série, resulta: $i = \dfrac{U_g}{R_g} = \dfrac{U_M}{R_M} \Rightarrow U_M = \dfrac{U_g R_M}{R_g}$

V3_P1_UN_B_CAP_08.indd 186 19.09.09 09:46:12

Sendo $U_{AB} = U_g + U_M$, vem: $U_{AB} = U_g + \frac{U_g \cdot R_M}{R_g} \Rightarrow$ $U_{AB} = U_g \cdot \left(1 + \frac{R_M}{R_g}\right)$

Para medir a ddp entre os terminais A e B de um resistor de resistência R, ligamos o voltímetro **em paralelo**, conforme mostra a **figura 6**. A corrente I divide-se no nó A e a ddp U_{AB} é a mesma no resistor e no voltímetro:

$$U_{AB} = R_V \cdot i = R(I - i) \Rightarrow R_V \cdot i = R \cdot I - R \cdot i$$

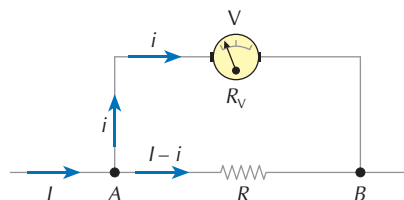



Figura 6. Para medir a ddp entre os terminais do resistor, deve-se colocar o voltímetro em paralelo com o resistor, de modo que seja submetido à mesma ddp a ser medida.

O produto $R_V \cdot i$ representa a ddp U_{AB} quando o voltímetro é ligado, e será denominado **valor lido** (V_{lido}). O produto $R \cdot I$ representa o **valor exato** (V_{exato}) da ddp U_{AB} antes da introdução do aparelho de medida.

Da fórmula anterior, temos: $V_{lido} = V_{exato} - R \cdot i$

Com base nessa fórmula, o valor lido no aparelho é tanto mais próximo do valor exato quanto menor a corrente elétrica desviada para o voltímetro. Esse efeito é obtido com uma resistência elétrica elevada do voltímetro, condição em que o valor da corrente i se torna desprezível ($i \simeq 0$ e, portanto, $R \cdot i \simeq 0$).

Então: $V_{lido} = V_{exato}$

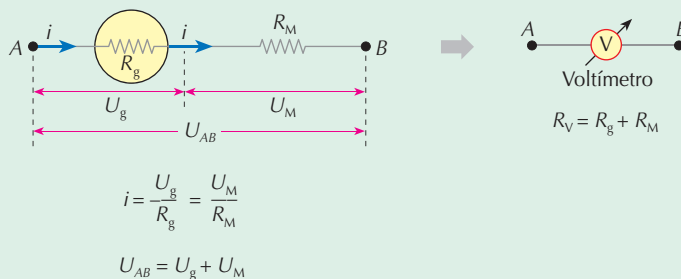
Voltímetro ideal é aquele cuja resistência elétrica é infinita.

Quando a resistência elétrica do voltímetro é enorme em relação às resistências do circuito, o voltímetro é considerado ideal. A escala do voltímetro é graduada diretamente em volts.

Resumindo:

Um voltímetro é, portanto, um aparelho constituído por um galvanômetro ao qual se associa em série um resistor de **resistência elétrica** elevada R_M, podendo ultrapassar 10.000 Ω.

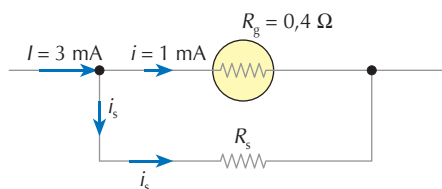
$$i = \frac{U_g}{R_g} = \frac{U_M}{R_M}$$

$$U_{AB} = U_g + U_M$$

O voltímetro é **colocado em paralelo** com o trecho de circuito onde se quer medir a ddp.

Entre na rede No endereço eletrônico http://www.ngsir.netfirms.com/englishhtm/Meter.htm (acesso em julho/2009), você pode realizar simulações para verificar como funciona o *shunt* de um amperímetro e o multiplicador de um voltímetro.

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

R. 71 Um galvanômetro de resistência 0,4 Ω e fundo de escala 1 mA deve ser usado para medir intensidades de corrente elétrica até 3 mA. Calcule a resistência elétrica do *shunt* necessário.

Solução:
O *shunt* é ligado em paralelo com o galvanômetro.

Sendo a intensidade da corrente elétrica máxima i = 1 mA no galvanômetro, e querendo-se usá-lo para medir até I = 3 mA, pelo *shunt* deve passar:

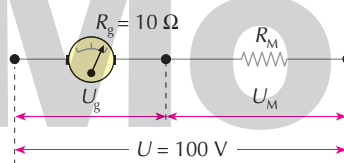
$$i_s = I - i \Rightarrow i_s = 3\text{ mA} - 1\text{ mA} \Rightarrow i_s = 2\text{ mA}$$

Estando o galvanômetro e o *shunt* associados em paralelo:

$$U = R_g \cdot i = R_s \cdot i_s \Rightarrow 0,4 \cdot 1 = R_s \cdot 2 \Rightarrow \boxed{R_s = 0,2\ \Omega}$$

Resposta: 0,2 Ω

R. 72 Deseja-se transformar um galvanômetro de resistência elétrica 10 Ω e fundo de escala 10 mA em um voltímetro para medir até 100 V. Calcule o valor da resistência multiplicadora em série que se deve usar.

Solução:

A ddp no galvanômetro será $U_g = R_g \cdot i$.
Sendo $R_g = 10\ \Omega$ e $i = 10\text{ mA} = 10 \cdot 10^{-3}$ A, vem:

$$U_g = 10 \cdot 10 \cdot 10^{-3} \Rightarrow U_g = 10^{-1}\text{ V} \Rightarrow U_g = 0,1\text{ V}$$

Na resistência R_M em série, a ddp U_M será:

$$U_M = U - U_g \Rightarrow U_M = 99,9\text{ V}$$

Pela lei de Ohm, temos:

$$R_M = \frac{U_M}{i} \Rightarrow R_M = \frac{99,9}{10 \cdot 10^{-3}} \Rightarrow R_M = 99,9 \cdot 10^2 \Rightarrow R_M = 9.990\ \Omega$$

Resposta: 9.990 Ω

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

P. 175 Tem-se um galvanômetro de resistência elétrica 10 Ω e fundo de escala 50 mA. Quer-se adaptar esse galvanômetro para medir intensidades de corrente elétrica até 1,0 A. Calcule o valor da resistência *shunt* a ser utilizada e a resistência do conjunto (galvanômetro “shuntado”).

P. 176 Tem-se um galvanômetro de resistência elétrica 100 Ω e fundo de escala 5 mA. Quer-se utilizar esse aparelho como voltímetro que permita medir até 100 V. Calcule o valor da resistência multiplicadora em série que se deve associar.

Seção 8.2

Ponte de Wheatstone

Objetivo

Conhecer o funcionamento da ponte de Wheatstone.

Termos e conceitos

- ohmímetros
- ponte de Wheatstone

Assim como se mede a corrente elétrica com um amperímetro e a ddp com um voltímetro, constroem-se circuitos para a medida da resistência elétrica, genericamente chamados de **ohmímetros**. Um dos circuitos mais usados é denominado **ponte de Wheatstone***, cujo esquema convencional está indicado na **figura 7**, onde quatro resistores estão dispostos segundo os lados de um losango. Sejam R_1 a resistência a ser medida, R_2 um reostato, e R_3 e R_4 resistores dos quais se conhecem as resistências ou, pelo menos, a razão entre elas. Dois nós do losango (A e C) são ligados ao circuito que contém o gerador. Aos outros dois nós (B e D) está ligado o galvanômetro G.

O esquema é chamado **ponte** porque o galvanômetro estabelece uma ponte de ligação entre os dois ramos paralelos, ABC e ADC.

Ajusta-se o valor de R_2 de modo que o **galvanômetro não acuse passagem de corrente elétrica** ($i_g = 0$). A **ponte** está, então, em **equilíbrio** e os pontos B e D têm o **mesmo potencial** ($V_B = V_D$). Daí:

$$V_A - V_B = V_A - V_D \quad \text{e} \quad V_B - V_C = V_D - V_C$$

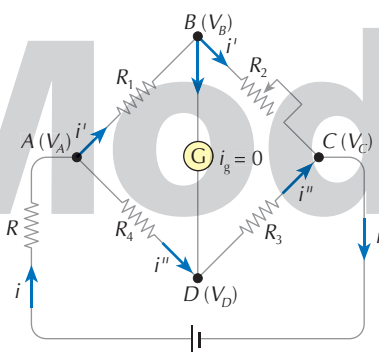



Figura 7. Esquema convencional da ponte de Wheatstone.

A corrente elétrica i', que passa por R_1, também passa por R_2; a corrente elétrica i'', que passa por R_4, também passa por R_3. Pela lei de Ohm:

$V_A - V_B = R_1 \cdot i'$

$V_A - V_D = R_4 \cdot i''$

$V_B - V_C = R_2 \cdot i'$

$V_D - V_C = R_3 \cdot i''$

Igualando as ddps, obtemos:

$$R_1 \cdot i' = R_4 \cdot i'' \text{ e } R_2 \cdot i' = R_3 \cdot i''$$

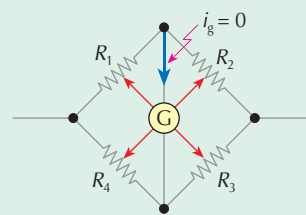
Dividindo membro a membro, vem:

$$\frac{R_1 \cdot i'}{R_2 \cdot i'} = \frac{R_4 \cdot i''}{R_3 \cdot i''} \Rightarrow \frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3} \Rightarrow R_1R_3 = R_2R_4$$

* **WHEATSTONE**, Charles (1802-1875), físico inglês, realizou trabalhos sobre Acústica e Óptica, porém é mais conhecido por ter idealizado o esquema de ponte que permitiu a medida precisa de uma resistência elétrica.

Resumindo:

Em uma ponte de Wheatstone, em equilíbrio, são iguais os produtos das resistências opostas:

$$R_1R_3 = R_2R_4$$

O circuito da figura foi montado com cinco lâmpadas iguais. Explique por que a lâmpada central permanece apagada.

Em laboratórios, a ponte de Wheatstone é empregada sob a forma conhecida como **ponte de fio** (fig. 8). Substituem-se os resistores R_3 e R_4 por um fio homogêneo de seção transversal constante, sobre o qual se apoia um cursor ligado ao galvanômetro; o cursor realiza o equilíbrio em posição conveniente. A resistência R_2 é fixa, sendo denominada **resistência de comparação**.

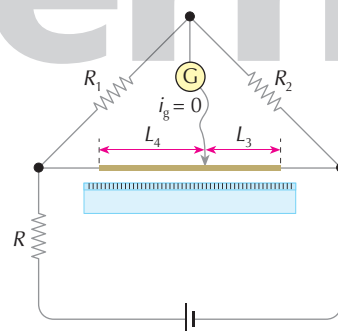
Figura 8.

Tem-se $R_1R_3 = R_2R_4$.

Sendo $R_3 = \rho \cdot \dfrac{L_3}{A}$ e $R_4 = \rho \cdot \dfrac{L_4}{A}$, vem:

$$R_1 \cdot \rho \cdot \frac{L_3}{A} = R_2 \cdot \rho \cdot \frac{L_4}{A}$$

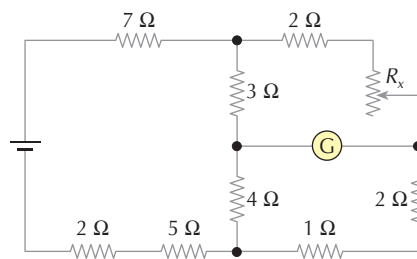
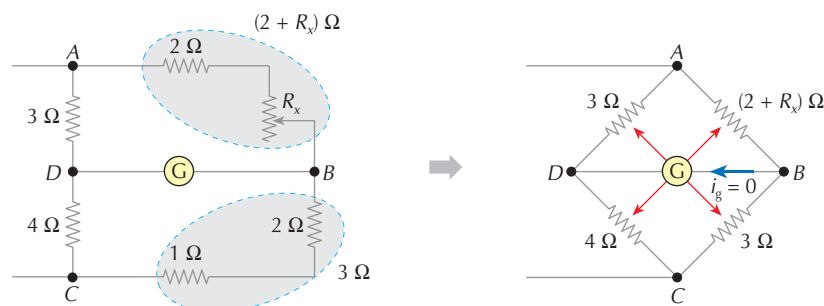
Portanto:

$$R_1L_3 = R_2L_4 \quad \text{ou} \quad R_1 = R_2 \cdot \left(\frac{L_4}{L_2}\right)$$

É importante notar que não influem na propriedade da ponte o gerador e as resistências (R) que formam o circuito de alimentação da ponte de Wheatstone.

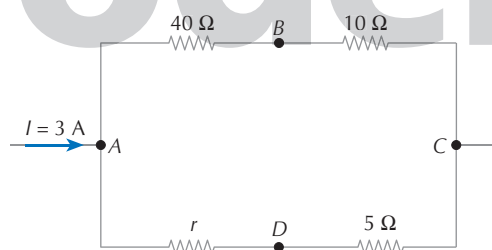
Entre na rede No endereço eletrônico http://br.geocities.com/saladefisica3/laboratorio/wheatstone/wheatstone.htm (acesso em julho/2009), variando a resistência de um reostato, você consegue o equilíbrio de uma ponte de Wheatstone. No endereço eletrônico http://www.walter-fendt.de/ph14e/wheatstone_e.htm (acesso em julho/2009), você encontra uma simulação da ponte de fio.

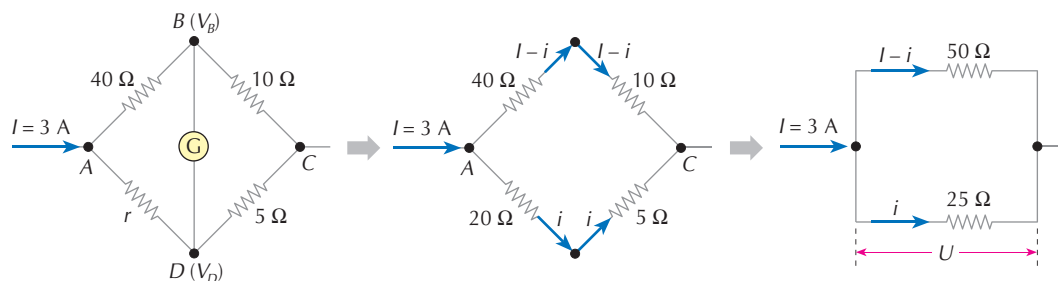
Conteúdo digital Moderna PLUS http://www.modernaplus.com.br
Atividade experimental: *Construindo uma ponte de Wheatstone*

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

R. 73 Dado o circuito da figura, calcule o valor da resistência variável R_x, para o qual o galvanômetro G indica zero.

Solução:
Considerando apenas a ponte de Wheatstone, temos:

Sendo $i_g = 0$, decorre: $(2 + R_x) \cdot 4 = 3 \cdot 3 \Rightarrow 8 + 4R_x = 9 \Rightarrow 4R_x = 1 \Rightarrow \boxed{R_x = 0{,}25\ \Omega}$

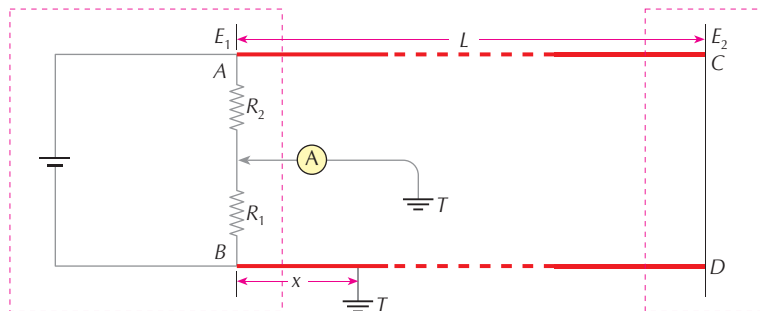
Resposta: 0,25 Ω

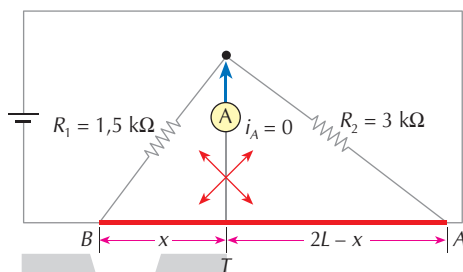
R. 74 No circuito da figura ao lado, o potencial do ponto B é igual ao potencial do ponto D. A intensidade de corrente elétrica que entra no circuito pelo ponto A é $I = 3$ A. Calcule a potência dissipada no resistor r.

Solução:
Sendo $V_B = V_D$, um galvanômetro colocado entre B e D indicará $i_g = 0$ e resultará no esquema da ponte de Wheatstone:

$$40 \cdot 5 = 10r \Rightarrow r = \frac{200}{10} \Rightarrow r = 20\ \Omega$$

Como a ddp é a mesma, vem: $U = 25 \cdot i = 50 \cdot (3 - i) \Rightarrow i = 2$ A

No resistor r, temos: $Pot = r \cdot i^2 \Rightarrow Pot = 20 \cdot (2)^2 \Rightarrow \boxed{Pot = 80\ W}$

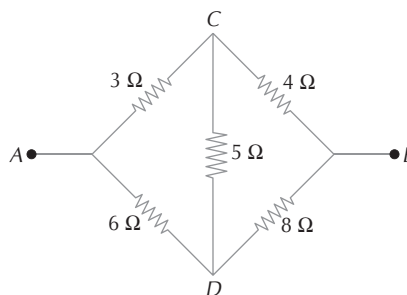
Resposta: 80 W

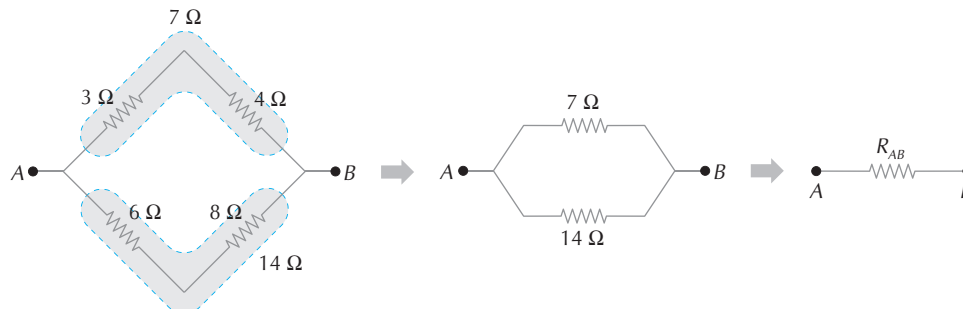
R. 75 Uma linha telefônica constituída por um par de fios idênticos liga entre si as estações E_1 e E_2, distantes $L = 30$ km. Em determinado ponto, a linha está defeituosa, com um dos fios fazendo contato com a terra. Para localizar o defeito, efetuou-se a ligação esquematizada na figura a seguir, curto-circuitando *C* e *D* na estação E_2 e ajustando o cursor, de modo que o amperímetro A, na estação E_1, não indique passagem de corrente. As ligações com a terra são excelentes, isto é, equivalentes à introdução no circuito de uma resistência elétrica nula. Sendo $R_1 = 1{,}5$ kΩ e $R_2 = 3$ kΩ, calcule a distância x do ponto de defeito à estação E_1.

Solução:

O esquema pode ser modificado, conforme a figura abaixo, resultando numa **ponte de fio**.

Como $i_A = 0$, segue:

$$R_1 \cdot (2L - x) = R_2 \cdot x \Rightarrow 1{,}5 \cdot (2 \cdot 30 - x) = 3x \Rightarrow 60 - x = 2x \Rightarrow 60 = 3x \Rightarrow \boxed{x = 20 \text{ km}}$$

Resposta: 20 km

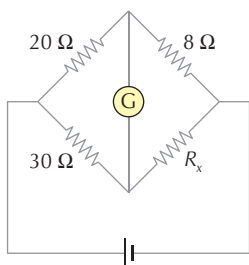
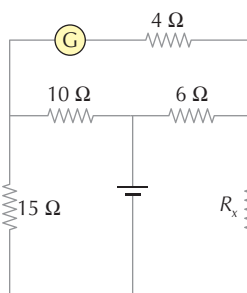
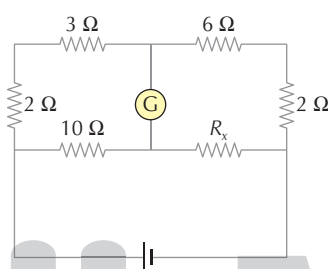
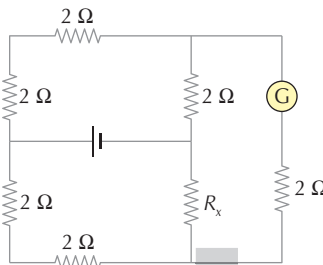
R. 76 Dada a associação na figura ao lado, calcule a resistência elétrica equivalente entre os pontos *A* e *B*.

Solução:

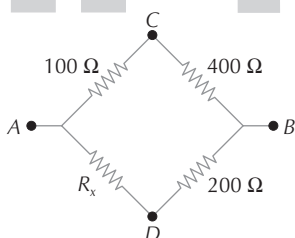
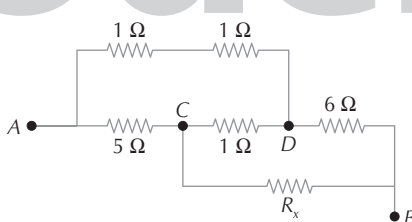
Observando os produtos das resistências opostas: $3 \cdot 8 = 4 \cdot 6$, concluímos que $V_C = V_D$. Então, não passa corrente elétrica no resistor de 5 Ω, que pode ser excluído do esquema, ficando:

$$R_{AB} = \frac{7 \cdot 14}{7 + 14} \Rightarrow R_{AB} = \frac{98}{21} \Rightarrow \boxed{R_{AB} \simeq 4{,}7\ \Omega}$$

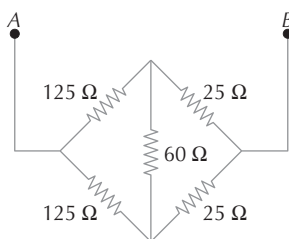
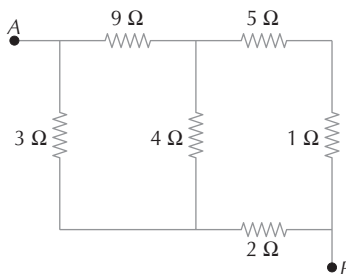
Resposta: ≃4,7 Ω

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

P.177 Nos circuitos das figuras abaixo, o galvanômetro G indica zero. Calcule o valor da resistência elétrica R_x.

(I)

(III)

(II)

(IV)

P.178 Nos trechos das figuras, os pontos *A* e *B* têm potenciais diferentes. Para que o potencial do ponto *C* seja igual ao do ponto *D*, qual o valor da resistência elétrica R_x?

(I)

(II)

P.179 Dadas as associações na figura, calcule a resistência equivalente entre os pontos *A* e *B*.

(I)

(II)

O multímetro

Para os eletricistas é muito útil possuir um único aparelho que lhes permita fazer medidas de ddp, de correntes e de resistências elétricas. Tal aparelho existe e é denominado **multímetro**. Temos então, num único aparelho, um voltímetro, um amperímetro e um ohmímetro.

Geralmente o multímetro deve ser usado com cuidado, possuindo uma chave seletora cuja posição determina a grandeza a ser medida ou uma série de orifícios onde devem ser introduzidos os pinos de ligação. Cada um dos medidores costuma ter mais de um fundo de escala, conforme a ordem de grandeza do valor a ser medido.

Existem vários modelos de multímetro: o da esquerda é um multímetro de ponteiro (analógico) e o da direita é um multímetro digital.

Entre na rede No endereço eletrônico http://www.phy.ntnu.edu.tw/oldjava/portuguese/simulacoes.html (acesso julho/2009), você pode realizar simulações com a introdução de um multímetro em um circuito elétrico.

EXERCÍCIOS PROPOSTOS DE RECAPITULAÇÃO

P. 180 (EEM-SP) É dado um galvanômetro de resistência interna 0,25 ohm que se funde quando por ele passa uma corrente maior do que 0,15 A.

a) Explique o que se deve fazer para se poder utilizar esse galvanômetro na medida de uma corrente de 5,0 A.

b) Faça o esquema da ligação correspondente.

P. 181 (Faap-SP) Um galvanômetro que mede correntes de 0 a 1,0 mA tem resistência de 40 Ω. Como esse galvanômetro pode ser usado para medir correntes de 0 a 1,0 A?

P. 182 (FEI-SP) Um galvanômetro tem resistência interna $R_g = 2,5$ kΩ e pode medir diretamente intensidades de corrente até 50 μA. Como devemos adaptar esse galvanômetro para medir tensões de até 20 V?

P. 183 (Efei-MG) Um amperímetro, cuja resistência elétrica é 9,9 Ω quando usado para medir até 5 A, deve ser equipado com uma resistência *shunt* de 0,1 Ω.

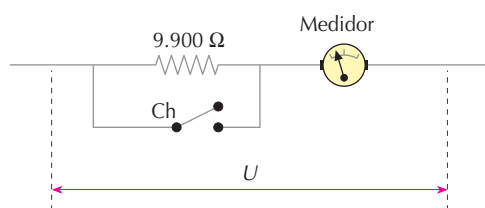
a) Calcule a corrente de fundo de escala desse aparelho.

b) Que resistência deveria ser usada e como ela deveria ser ligada, caso esse amperímetro fosse empregado como voltímetro para medir até 50 V?

P.184 (Vunesp) Um medidor de corrente comporta-se, quando colocado num circuito elétrico, como um resistor. A resistência desse resistor, denominada resistência interna do aparelho, pode, muitas vezes, ser determinada diretamente a partir de dados (especificações) impressos no aparelho. Suponha, por exemplo, que num medidor comum de corrente, com ponteiro e escala graduada, constem as seguintes especificações:

- corrente de fundo de escala, isto é, corrente máxima que pode ser medida: $1{,}0 \cdot 10^{-3}$ A (1,0 mA);
- tensão a que deve ser submetido o aparelho, para que indique a corrente de fundo de escala: $1{,}0 \cdot 10^{-1}$ V (100 mV).

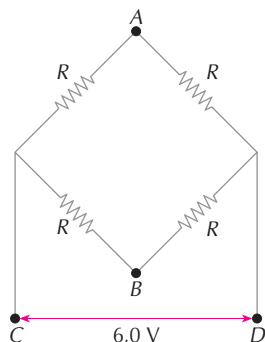
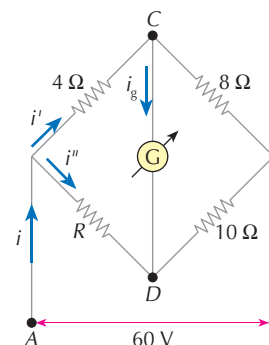
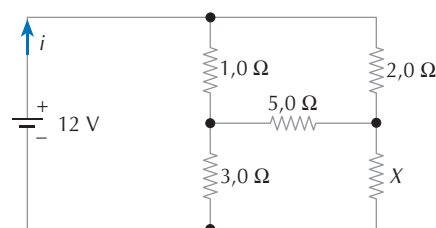
a) Qual o valor da resistência interna desse aparelho?

b) Como, pela lei de Ohm, a corrente no medidor é proporcional à tensão nele aplicada, esse aparelho pode ser usado, também, como medidor de tensão, com fundo de escala 100 mV. Visando medir tensões maiores, associou-se-lhe um resistor de 9.900 ohms, como mostra a figura.

Assim, quando a chave Ch está fechada, é possível medir tensões até 100 mV, o que corresponde à corrente máxima de 1,0 mA pelo medidor, conforme consta das especificações. Determine a nova tensão máxima que se poderá medir, quando a chave Ch estiver aberta.

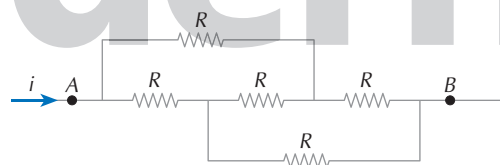
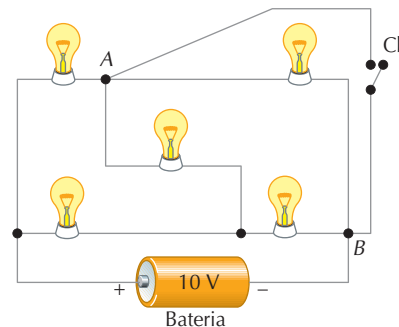
P.185 (UFF-RJ) Um amperímetro tem uma resistência de 39,8 Ω e sua agulha desvia-se de uma divisão quando ele é atravessado por uma corrente de 1 mA. Dispõe-se de duas resistências, $R_1 = 0{,}2\ \Omega$ e $R_2 = 60{,}2\ \Omega$. Associando-se adequada e separadamente essas duas resistências ao amperímetro, transformamo-lo em um voltímetro que registra x divisões por volt ou em outro amperímetro que registra y divisões por ampère. Calcule os valores de x e y.

P.186 (Fuvest-SP) No circuito, o gerador, que mantém entre os pontos *C* e *D* uma tensão constante de 6,0 V, alimenta quatro resistências, em paralelo duas a duas. Cada uma das resistências vale $R = 2{,}0\ \Omega$.

a) Qual o valor da tensão entre os pontos *A* e *B*?

b) Qual o valor da corrente que passa pelo ponto *A*?

P.187 A ponte de Wheatstone indicada na figura está em equilíbrio.
Determine R, i_g, i′, i″ e i.

P.188 (Unicamp-SP) No circuito da figura, a corrente elétrica na resistência de 5,0 Ω é nula.

a) Determine o valor da resistência X.

b) Qual a intensidade *i* da corrente que atravessa o gerador?

P.189 Para o circuito da figura determine a ddp entre os pontos A e B. Sabe-se que $i = 2{,}0$ A e $R = 10\ \Omega$.

P.190 (UFRJ) Cinco lâmpadas idênticas, que podem ser consideradas como resistores ideais de 10 ohms cada uma, estão ligadas a uma bateria de 10 volts, como é mostrado na figura abaixo. O circuito possui também uma chave Ch que, quando fechada, estabelece um curto-circuito entre os pontos A e B.

Calcule:

a) a corrente que passa pela lâmpada ou lâmpadas de maior brilho quando Ch está aberta;

b) a corrente que passa pela lâmpada ou lâmpadas com a segunda maior intensidade de brilho quando Ch está fechada.

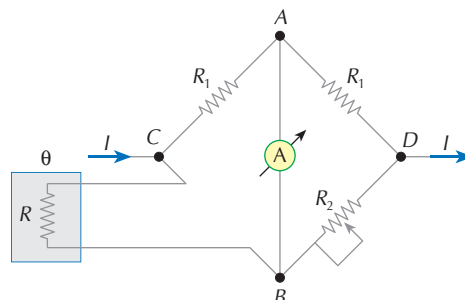
P. 191 Mede-se a resistência elétrica R_1 de um resistor, com a ponte de Wheatstone de fio, em que este tem 1 m de comprimento. A resistência de comparação é de 50 Ω e o equilíbrio da ponte se dá estando o cursor a 80 cm da extremidade do fio, que fica ao lado do resistor. Determine:

a) o esquema dessa ponte, indicando o amperímetro e o gerador de alimentação;

b) a nova posição de equilíbrio do cursor se, por aquecimento, a resistência do resistor aumentar 25%.

P. 192 (Unicamp-SP) A variação de uma resistência elétrica com a temperatura pode ser utilizada para medir a temperatura de um corpo. Considere uma resistência R que varia com a temperatura θ de acordo com a fórmula:

$$R = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \theta)$$

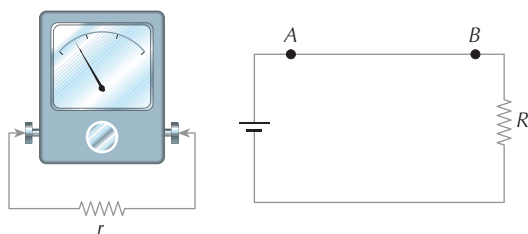
onde $R_0 = 100\ \Omega$, $\alpha = 4 \cdot 10^{-3}\ °C^{-1}$ e θ é dada em graus Celsius. Essa resistência está em equilíbrio térmico com o corpo, cuja temperatura θ deseja-se conhecer. Para medir o valor de R ajusta-se a resistência R_2, indicada no circuito abaixo, até que a corrente medida pelo amperímetro no trecho AB seja nula.

a) Qual a temperatura θ do corpo quando a resistência R_2 for igual a 108 Ω?

b) A corrente através da resistência R é igual a $5{,}0 \cdot 10^{-3}$ A. Qual a diferença de potencial entre os pontos C e D indicados na figura?

TESTES PROPOSTOS

T. 174 (Uerj) Um miliamperímetro tem, em paralelo, uma resistência cujo valor é 99 vezes menor que sua resistência. O fator de multiplicação do *shunt* é igual a:

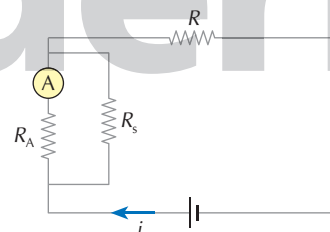
a) 0,01
b) 100
c) 99
d) 9,9
e) 0,99

T. 175 (Vunesp) Pretende-se medir a corrente no circuito da figura intercalando-se entre os pontos A e B um amperímetro que tem resistência interna de 1,5 Ω.

Acontece que o máximo valor que o instrumento mede (fundo de escala) é 3,0 A e a corrente no circuito é maior que isso. Aumentando-se o fundo de escala para 4,5 A, o instrumento pode ser utilizado. São fornecidos resistores (r) que devem ser ligados ao amperímetro, na forma indicada, de modo que sua escala seja ampliada para 4,5 A. Que valor de resistência (r) satisfaz o requisito?

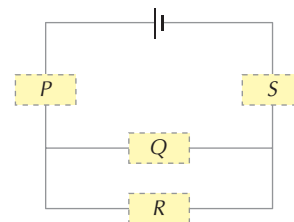
a) 4,0 Ω
b) 3,0 Ω
c) 2,0 Ω
d) 1,0 Ω
e) 0,5 Ω

T. 176 (Mackenzie-SP) Usando um voltímetro de fundo de escala de 20 V e resistência interna de 2.000 Ω, desejamos medir uma ddp de 100 V. A resistência do resistor adicional que devemos associar a esse voltímetro é:

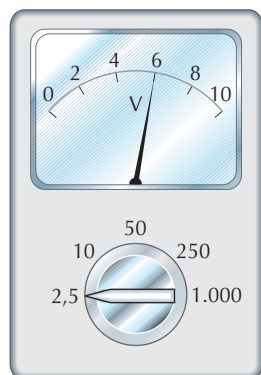
a) 1 kΩ
b) 2 kΩ
c) 6 kΩ
d) 8 kΩ
e) 12 kΩ

T. 177 (Mackenzie-SP) O amperímetro A, descrito no circuito abaixo, possui resistência interna $R_A = 9{,}0 \cdot 10^{-2}\ \Omega$. Devido às suas limitações, teve de ser "shuntado" com a resistência $R_s = 1{,}0 \cdot 10^{-2}\ \Omega$.

Nessas condições, a intensidade de corrente medida em A é 1,0 A; portanto, a intensidade de corrente i é:

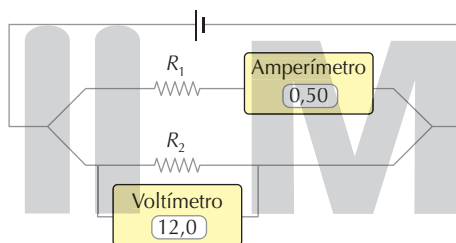
a) 19 A
b) 10 A
c) 9,0 A
d) 0,90 A
e) 0,10 A

T. 178 (Univás-MG) Para estudar como a resistência de uma lâmpada varia quando ela é submetida a diferentes tensões, uma pessoa pretende montar o circuito abaixo, colocando nele os elementos: lâmpada, voltímetro, amperímetro e reostato.

As posições adequadas para colocar esses elementos no circuito são, respectivamente:

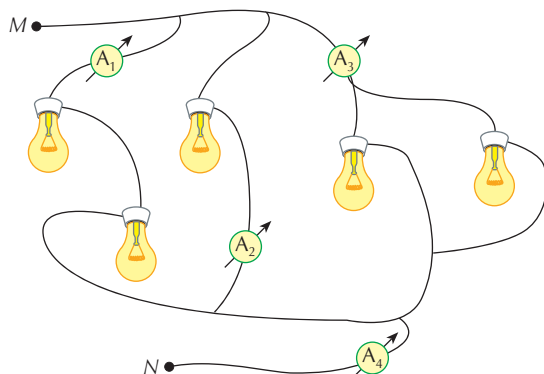
a) P, Q, R, S
b) Q, R, P, S
c) P, R, S, Q
d) S, P, R, Q
e) R, S, Q, P

T. 179 (UFMT) O voltímetro da figura, constituído por um indicador analógico e uma chave de mudança de escala, está sendo utilizado para medir a diferença de potencial de uma bateria.

Com base nas informações da figura, pode-se dizer que a bateria possui:

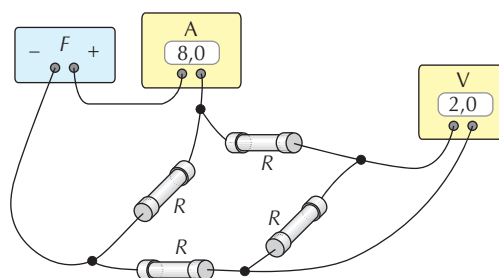
a) 6,0 V
b) 15 V
c) 2,5 V
d) 1,5 V
e) 9,0 V

T. 180 (Univale-MG) O amperímetro e o voltímetro ideais, ligados no circuito elétrico esquematizado na figura, indicam as leituras da corrente elétrica (em ampère) e a tensão (em volt).

Os resistores R_1 e R_2 têm a mesma resistência elétrica. Qual a resistência elétrica equivalente que substitui a associação dos resistores R_1 e R_2?

a) 6 Ω
b) 12 Ω
c) 24 Ω
d) 48 Ω
e) 96 Ω

T. 181 (Fuvest-SP) Para um teste de controle, foram introduzidos três amperímetros ideais (A_1, A_2 e A_3) em um trecho de um circuito, entre *M* e *N*, por onde passa uma corrente total de 14 A (indicada pelo amperímetro A_4). Nesse trecho, encontram-se cinco lâmpadas, interligadas como na figura, cada uma delas com resistência invariável *R*.

Nessas condições, os amperímetros A_1, A_2 e A_3 indicarão, respectivamente, correntes I_1, I_2 e I_3 com valores aproximados de:

a) I_1 = 1,0 A, I_2 = 2,0 A, I_3 = 11 A
b) I_1 = 1,5 A, I_2 = 3,0 A, I_3 = 9,5 A
c) I_1 = 2,0 A, I_2 = 4,0 A, I_3 = 8,0 A
d) I_1 = 5,0 A, I_2 = 3,0 A, I_3 = 6,0 A
e) I_1 = 8,0 A, I_2 = 4,0 A, I_3 = 2,0 A

T. 182 (Fuvest-SP) Considere a montagem abaixo, composta por 4 resistores *R* iguais, uma fonte de tensão *F*, um medidor de corrente A, um medidor de tensão V e fios de ligação.

O medidor de corrente indica 8,0 A e o de tensão 2,0 V. Pode-se afirmar que a potência total dissipada nos 4 resistores é, aproximadamente, de:

a) 8 W
b) 16 W
c) 32 W
d) 48 W
e) 64 W

T. 183 (ITA-SP) A resistência de um resistor é medida usando-se um voltímetro e um amperímetro. Quando o voltímetro é ligado diretamente nos terminais do resistor, as leituras obtidas são 50 V e 0,55 A (figura I). Quando o voltímetro é ligado de acordo com a figura II, as leituras são 54,3 V e 0,54 A.

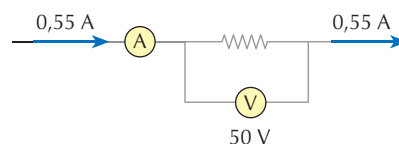



Figura I

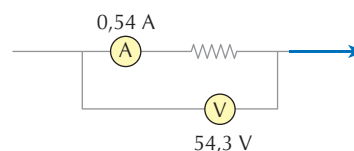
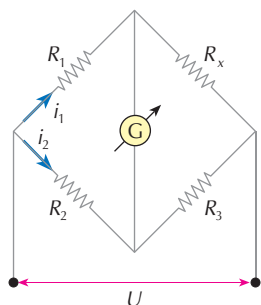



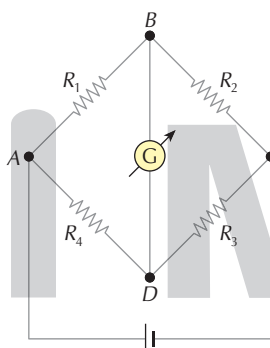
Figura II

A resistência do voltímetro é de 1.000 Ω. Nessas condições, as resistências do resistor e do amperímetro são, respectivamente:

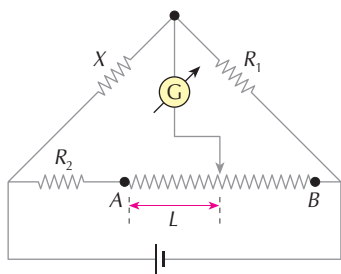
a) 50 Ω e 0,23 Ω
b) 100 Ω e 1 Ω
c) 75 Ω e 0,75 Ω
d) 0,50 Ω e 0,46 Ω
e) 100 Ω e 0,56 Ω

T. 184 (PUC-SP) A figura mostra o esquema de uma ponte de Wheatstone. Sabe-se que $U = 3$ V; $R_2 = R_3 = 5\ \Omega$ e o galvanômetro é de zero central. A ponte entra em equilíbrio quando a resistência $R_1 = 2$ C.

As correntes i_1 e i_2 (em ampère) valem, respectivamente:

a) zero e zero
b) 2 e 2
c) 0,75 e 0,30
d) 0,30 e 0,75
e) 0,43 e 0,43

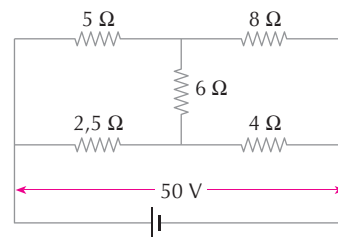
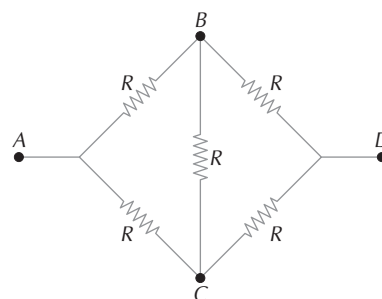
T. 185 (Fesp-SP) O dispositivo da figura é chamado de ponte de Wheatstone. O galvanômetro G acusa corrente $i_g = 0$.

Assinale a alternativa falsa.

a) A ddp $V_B - V_D = 0$.
b) Os resistores R_1 e R_2 são atravessados pela mesma corrente.
c) Os resistores R_3 e R_4 são atravessados por correntes de intensidade diferentes.
d) Verifica-se que $V_A - V_B = V_A - V_D$ e $V_B - V_C = V_D - V_C$.
e) É satisfeita a relação $R_1R_3 = R_2R_4$.

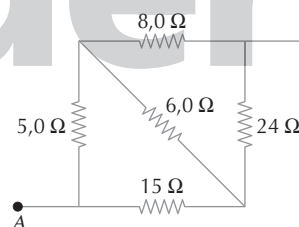
T. 186 (Unisa-SP) No circuito abaixo, $R_1 = 210\ \Omega$, $R_2 = 30{,}0\ \Omega$, $\overline{AB}$ é um fio homogêneo de seção constante e resistência 50,0 Ω e comprimento 500 mm.

Obteve-se o equilíbrio da ponte para $L = 150$ mm. O valor de X é em ohms:

a) 120 b) 257 c) 393 d) 180 e) 270

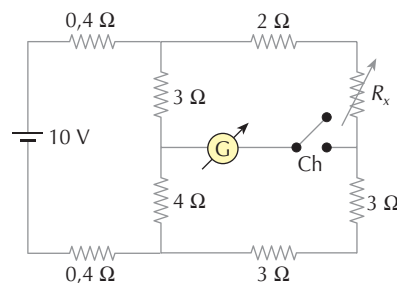
T. 187 (Unisa-SP) Dado o esquema, a potência dissipada no resistor de 6 Ω é:

a) 50 W
b) 10 W
c) 2 W
d) 0,5 W
e) zero

T. 188 (Fuvest-SP) No circuito, as resistências são idênticas e, consequentemente, é nula a diferença de potencial entre B e C.

Qual a resistência equivalente entre A e D?

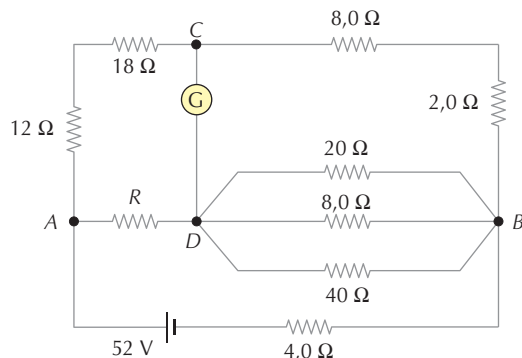
a) $\frac{R}{2}$ b) R c) $\frac{5R}{2}$ d) 4R e) 5R

T. 189 (Mackenzie-SP) Na associação da figura a ddp entre os terminais A e B é 78 V.

As intensidades de corrente nos resistores de 5,0 Ω, 6,0 Ω e 24 Ω são, respectivamente:

a) zero, zero e zero
b) 2,0 A, 2,0 A e 2,0 A
c) 2,0 A, zero e 6,0 A
d) 6,0 A, 6,0 A e 6,0 A
e) 6,0 A, zero e 2,0 A

T. 190 Fechando-se a chave Ch, no circuito esquematizado, observa-se que o galvanômetro G não acusará corrente elétrica.

A intensidade da corrente elétrica que atravessa o gerador é igual a:

a) 1 A b) 2 A c) 3 A d) 4 A e) 5 A

T. 191 (Ufal) Considere o circuito elétrico esquematizado abaixo.

Sabendo que o galvanômetro G não acusa passagem de corrente elétrica, analise, considerando os dados do esquema, as afirmações que seguem.

(01) A resistência *R* vale 15 Ω.

(02) A resistência equivalente entre *A* e *B* vale 40 Ω.

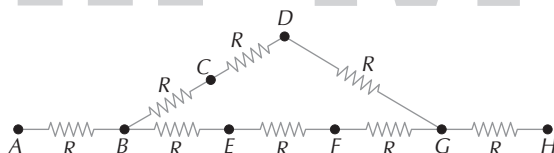
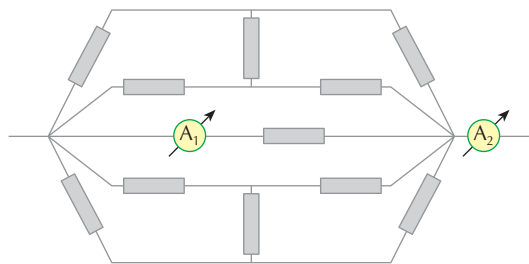
(04) A ddp entre *A* e *B* vale 40 V.

(08) A potência elétrica dissipada no resistor de 20 Ω vale 5,0 Ω.

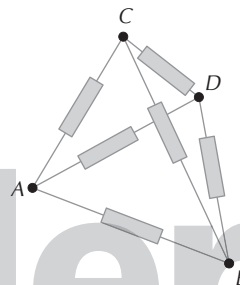
(16) A intensidade da corrente elétrica no resistor de 18 Ω vale 2,0 A.

Dê como resposta a soma dos números que precedem as afirmativas corretas.

T. 192 (E. Naval-RJ) Os oito resistores representados na figura são idênticos. Aplicando-se uma diferença de potencial entre os pontos *A* e *H*, qual o par de terminais que você pode segurar simultaneamente com as duas mãos, sem que haja perigo de sofrer "choque"?

a) *A* e *B*
b) *C* e *E*
c) *D* e *E*
d) *C* e *G*
e) *A* e *H*

T. 193 (UFPI) No circuito abaixo todos os resistores são idênticos e os amperímetros A_1 e A_2 são ideais (resistência interna nula). O amperímetro A_1 registra uma corrente $i = 2{,}0$ A.

Podemos assegurar que o amperímetro A_2 registra uma corrente igual a:

a) 12 A
b) 10 A
c) 8,0 A
d) 6,0 A
e) 4,0 A

T. 194 (ITA-SP) Considere um arranjo em forma de tetraedro construído com 6 resistências de 100 Ω, como mostrado na figura.

Pode-se afirmar que as resistências equivalentes R_{AB} e R_{CD} entre os vértices *A*, *B* e *C*, *D*, respectivamente, são:

a) $R_{AB} = R_{CD} = 33{,}3$ Ω
b) $R_{AB} = R_{CD} = 50$ Ω
c) $R_{AB} = R_{CD} = 66{,}7$ Ω
d) $R_{AB} = R_{CD} = 83{,}3$ Ω
e) $R_{AB} = 66{,}7$ Ω e $R_{CD} = 83{,}3$ Ω

UNIDADE B

Capítulo

9

Geradores elétricos

Gerador elétrico é um elemento de circuito que converte em energia elétrica outras formas de energia.

9.1 Gerador. Força eletromotriz

Os geradores apresentam duas características principais independentemente dos circuitos aos quais estejam ligados: a força eletromotriz e a resistência interna.

9.2 Circuito simples. Lei de Pouillet

A intensidade da corrente que percorre um circuito elétrico simples, do tipo gerador-resistor, é calculada pela lei de Pouillet.

9.3 Associação de geradores

Assim como os resistores, os geradores podem ser associados em série ou em paralelo.

9.4 Estudo gráfico da potência elétrica lançada por um gerador em um circuito

O gráfico da potência lançada pelo gerador em função da intensidade da corrente elétrica que o atravessa é uma parábola.

A balada sustentável

Já imaginou uma balada onde a eletricidade não vem da tomada e sim da animação da galera frequentadora? O segredo está na piezoeletricidade: capacidade que alguns materiais, como o quartzo, têm de gerar energia elétrica ao sofrer deformações.

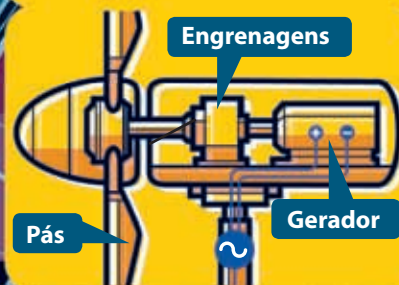
Placas de silício

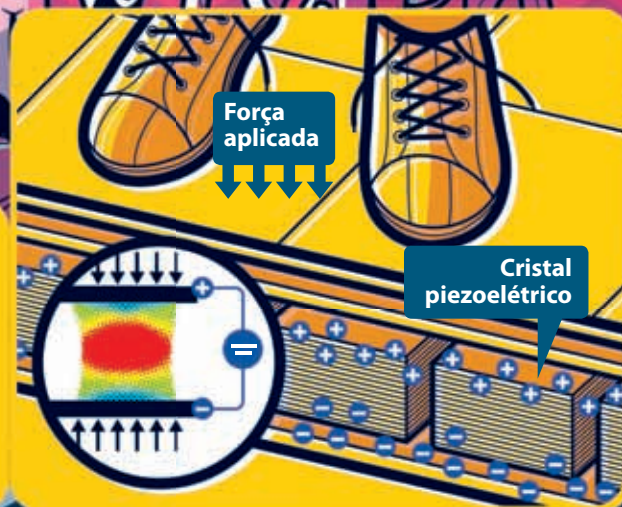
Célula fotovoltaica

Feita de material semicondutor, como o silício, absorve a energia solar fazendo com que os elétrons fracamente ligados possam fluir livremente, gerando uma corrente elétrica. Ao ligar as partes superior e inferior à uma bateria, pode-se armazenar essa energia.

Para pensar

Quanta energia elétrica poderia ser economizada mensalmente, com uma área de 20 m^2 de coletores fotovoltaicos? Admita uma incidência de radiação solar de 5 $kWh/m^2 \cdot$ dia e que a eficiência dos coletores seja de 16%.

Gerador eólico
Grandes hélices captam a energia cinética do vento e a transforma em energia elétrica. Basicamente, o gerador eólico funciona de maneira semelhante ao gerador de uma usina hidrelétrica.
Engrenagens
Gerador
Pás
Caso o DJ não empolgue a galera na pista, geradores de energia eólica e solar, estão à disposição no teto da balada para suprir o déficit de energia.
O vento ainda pode ser utilizado na refrigeração da casa, poupando no gasto com ar condicionado.
Força aplicada
Cristal piezoelétrico
Gerador piezoelétrico
Em baixo da pista, entre chapas de metal, ficam os cristais piezoelétricos, que quando comprimidos, têm suas cargas polarizadas, gerando uma descarga elétrica. Essa energia é armazenada em baterias e usada para alimentar o som e a iluminação.

Seção 9.1

Gerador. Força eletromotriz

Objetivos

- Conhecer a definição de gerador elétrico.
- Compreender o conceito de força eletromotriz.
- Conhecer os diversos tipos de geradores utilizados no dia a dia.
- Caracterizar potência elétrica dissipada, potência elétrica lançada no circuito externo e potência elétrica total gerada pelo gerador.
- Conceituar rendimento elétrico de um gerador.
- Compreender a equação do gerador.
- Analisar um gerador em curto-circuito e em circuito aberto.
- Analisar a curva característica de um gerador.

Termos e conceitos

- **baterias de acumuladores**
- **resistência interna**
- **volt**
- **gerador ideal**

Quando uma corrente elétrica atravessa um resistor, há transformação de energia elétrica em energia térmica. Vimos, anteriormente, que no circuito deve existir um aparelho que transforme outras formas de energia em energia elétrica e forneça essa energia ao resistor. Tal aparelho é denominado **gerador elétrico**.

Na **figura 1**, destacamos alguns tipos comuns de geradores. A energia química, desenvolvida em certas reações químicas, é a base de um grande número de **geradores químicos**. Entre estes figuram as **baterias de acumuladores**, que podem sofrer numerosas cargas e recargas, e também as **pilhas secas**, a maioria das quais tem duração limitada (**fig. 1A**). Nas usinas hidrelétricas, a energia mecânica de uma queda-d'água serve de base para os **geradores mecânicos** (**fig. 1B**).

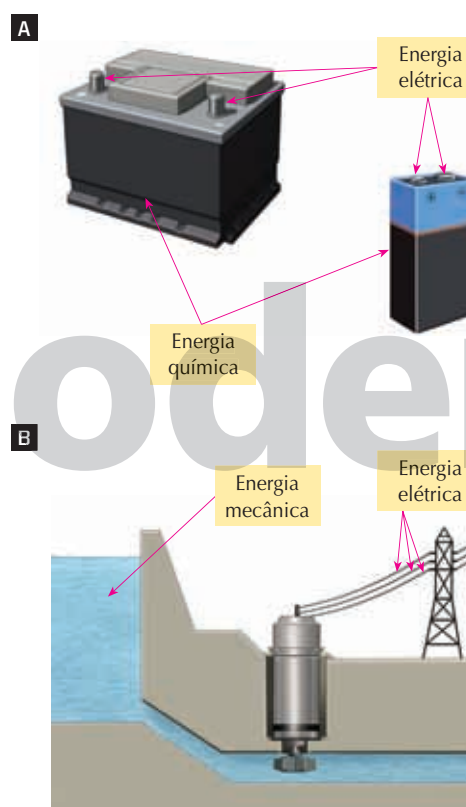



Figura 1. (A) Geradores químicos. (B) Geradores mecânicos.

Gerador elétrico é o aparelho que realiza a transformação de uma forma qualquer de energia em energia elétrica.

Um gerador elétrico possui dois terminais denominados polos: um **polo negativo**, correspondendo ao terminal de potencial elétrico menor, e um **polo positivo**, correspondendo ao terminal de potencial elétrico maior.

Considerando o sentido convencional da corrente elétrica (movimento das cargas positivas), o fornecimento de energia (química, mecânica) causará o movimento dessas cargas do polo negativo para o polo positivo, elevando, assim, a energia potencial elétrica das cargas.

Verifica-se experimentalmente que:

A potência elétrica total gerada (Pot_g) por um gerador é diretamente proporcional à intensidade da corrente elétrica i que o atravessa.

Isso significa que:

$$Pot_g = E \cdot i$$

em que a constante de proporcionalidade, representada pela letra E, é chamada **força eletromotriz (fem)*** do gerador. Dessa maneira, a força eletromotriz de um gerador pode ser definida pela fórmula:

$$E = \frac{Pot_g}{i}$$

Dessa definição concluímos que, utilizando-se unidades do Sistema Internacional, a fem terá como unidade o **volt**:

$$1\ \text{V} = \frac{1\ \text{W}}{1\ \text{A}}$$

A experiência revela que um gerador em funcionamento normal não lança no circuito externo toda a potência elétrica por ele gerada. Isso ocorre porque no interior do gerador a corrente elétrica passa por condutores que, por sua vez, dissipam uma parte da potência elétrica. Considera-se terem esses condutores uma resistência elétrica r, que se denomina **resistência interna** do gerador.

Em resumo:

Um **gerador** tem por função receber as cargas que constituem a corrente elétrica em seu potencial mais baixo (polo negativo) e entregá-las em seu potencial mais alto (polo positivo), fornecendo energia elétrica ao circuito. O gerador apresenta duas constantes características, independentes do circuito ao qual estiver ligado: a **fem** E (medida em volts) e a **resistência interna** r (em ohms). O gerador é indicado da seguinte maneira: (E, r).

Para representar um gerador entre dois pontos, A e B, de um circuito, utilizamos os símbolos da **figura 2**: a fem E do gerador é indicada acima de dois traços verticais (—|ı—), sendo o polo positivo representado pelo traço mais longo, e o polo negativo, pelo traço mais curto (—|ı—). Ao lado desses traços verticais indica-se a resistência interna do gerador (r).

No interior do gerador o sentido da corrente elétrica é do potencial menor para o potencial maior, isto é, do polo negativo para o polo positivo.

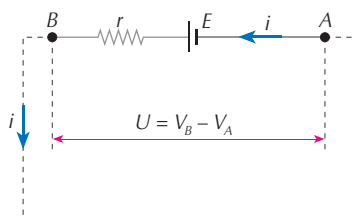



Figura 2. Gerador representado simbolicamente fornecendo energia a um circuito externo.

* Esse nome é mantido devido às origens históricas do gerador. Contudo, trata-se de uma denominação inadequada, visto que não se trata de força no sentido em que esse conceito é usado na Física.

1 As potências e o rendimento elétrico de um gerador

Como visto, a **potência elétrica total gerada** pelo gerador é:

$$Pot_g = E \cdot i$$

A **potência elétrica lançada** no circuito externo, isto é, a potência elétrica fornecida pelo gerador ao circuito externo é:

$$Pot_\ell = U \cdot i$$

em que $U = V_B - V_A$ é a tensão entre os polos do gerador.

A **potência elétrica dissipada internamente** é:

$$Pot_d = r \cdot i^2$$

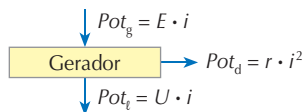



Figura 3. Esquema de potências em um gerador.

De acordo com a **figura 3**, e com base no princípio da conservação de energia, podemos concluir que:

$$Pot_g = Pot_\ell + Pot_d$$

O **rendimento elétrico** (η) do gerador é o quociente da potência elétrica lançada no circuito pela potência total gerada:

$$\eta = \frac{Pot_\ell}{Pot_g} \Rightarrow \eta = \frac{U \cdot i}{E \cdot i} \Rightarrow \eta = \frac{U}{E} \Rightarrow \boxed{\eta = \frac{U}{E}}$$

2 Equação do gerador. Circuito aberto

Sendo $Pot_g = Pot_\ell + Pot_d$, temos:

$$E \cdot i = U \cdot i + r \cdot i^2 \Rightarrow E = U + r \cdot i \Rightarrow \boxed{U = E - r \cdot i}$$

que é denominada **equação do gerador**.

Pode-se obter a equação do gerador supondo, como na **figura 4**, que a ddp U entre os terminais seja o resultado de uma elevação de potencial E e da queda de potencial $r \cdot i$.

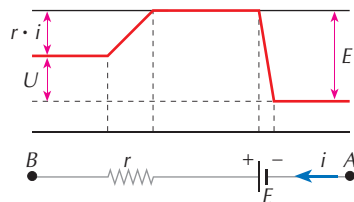



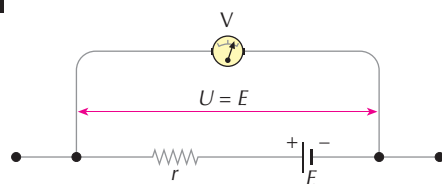
Figura 4. Potencial elétrico ao longo do gerador.

Um gerador está em **circuito aberto** quando não há percurso fechado para as cargas elétricas. Nesse caso não se estabelece corrente elétrica ($i = 0$) e, segundo a equação do gerador, concluímos que a ddp nos seus terminais é igual à sua fem:

$$U = E$$

Se ligarmos um voltímetro ideal **V** aos terminais de um gerador em circuito aberto (**fig. 5A**), **sua indicação é o valor da fem do gerador**.

Se o gerador fosse ideal, isto é, $r = 0$, teríamos: $U = E$. Assim, podemos dizer que **a fem *E* é a ddp nos terminais de um gerador ideal**. Na **figura 5B**, temos o símbolo de um gerador ideal.

A

B

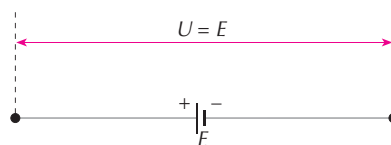



Figura 5. (A) No gerador em circuito aberto, a ddp nos terminais é igual à sua fem. (B) A ddp nos terminais de um gerador ideal ($r = 0$) é igual à sua fem.

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

R. 77 Um gerador de força eletromotriz 120 V e resistência interna 2 Ω, ligado a um circuito externo, gera a potência elétrica de 600 W. Determine:

a) a intensidade da corrente elétrica que atravessa o gerador;

b) a potência elétrica lançada no circuito externo e a potência dissipada internamente.

Solução:

a) De $Pot_g = E \cdot i$, vem: $600 = 120 \cdot i \Rightarrow \boxed{i = 5\text{ A}}$

b) A ddp U entre os terminais do gerador é dada por $U = E - r \cdot i$. Portanto:

$$U = 120 - 2 \cdot 5 \Rightarrow U = 110\text{ V}$$

A potência elétrica lançada no circuito externo é dada por:

$$Pot_\ell = U \cdot i \Rightarrow Pot_\ell = 110 \cdot 5 \Rightarrow \boxed{Pot_\ell = 550\text{ W}}$$

Para o cálculo da potência dissipada internamente basta lembrar que:

$$Pot_g = Pot_\ell + Pot_d \Rightarrow 600 = 550 + Pot_d \Rightarrow \boxed{Pot_d = 50\text{ W}}$$

Outro modo seria utilizando: $Pot_d = r \cdot i^2 \Rightarrow Pot_d = 2{,}0 \cdot (5)^2 \Rightarrow \boxed{Pot_d = 50\text{ W}}$

Resposta: a) 5 A; b) 550 W e 50 W

R. 78 Um gerador, de fem E e resistência interna r, fornece energia a uma lâmpada L. A ddp nos terminais do gerador é 100 V e a corrente elétrica que o atravessa vale 1 A. Sendo o rendimento do gerador 80%, calcule E e r.

Solução:

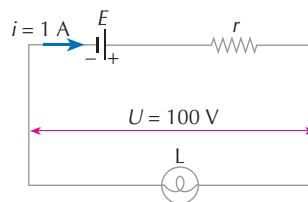
O circuito proposto pode ser esquematizado como na figura ao lado. Sendo o rendimento a relação entre a ddp nos terminais do gerador ($U = 100$ V) e sua fem E, temos: $\eta = \dfrac{U}{E}$

Como $\eta = 0{,}8$, tem-se:

$$0{,}8 = \frac{100}{E} \Rightarrow E = \frac{100}{0{,}8} \Rightarrow \boxed{E = 125\text{ V}}$$

Para determinarmos a resistência interna r, utilizamos a equação do gerador:

$$U = E - r \cdot i \Rightarrow 100 = 125 - r \cdot 1 \Rightarrow \boxed{r = 25\ \Omega}$$

Resposta: 125 V e 25 Ω

R. 79 Quando uma bateria está em circuito aberto, um voltímetro ideal ligado aos seus terminais marca 12 V. Quando a bateria está fornecendo energia a um resistor R, estabelece no circuito uma corrente 1 A e o voltímetro registra 10 V nos terminais da bateria. Determine a fem e a resistência interna da bateria.

Solução:

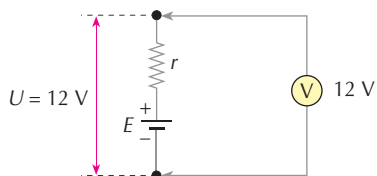



Figura I.

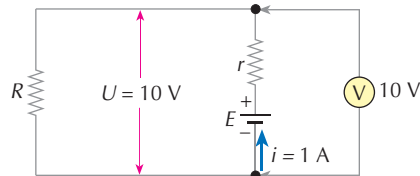



Figura II.

Em circuito aberto (figura I), o voltímetro ideal indica 12 V, que é a própria fem E do gerador:

$$\boxed{E = 12\text{ V}}$$

No circuito fechado (figura II), pela equação do gerador, temos:

$$U = E - r \cdot i \Rightarrow 10 = 12 - r \cdot 1 \Rightarrow \boxed{r = 2\ \Omega}$$

Resposta: 12 V e 2 Ω

R. 80 Uma pilha de lanterna possui fem 1,5 V. Calcule a energia que a pilha gera para cada carga elétrica igual a 1 C que a atravessa.

Solução:
De $E_{el.} = Pot_g\ \Delta t$, vem $E_{el.} = E \cdot i \cdot \Delta t$. Sendo $i \cdot \Delta t = \Delta q$, resulta $E_{el.} = E \cdot \Delta q$. Fazendo $E = 1,5$ V e $\Delta q = 1$ C, obtém-se:

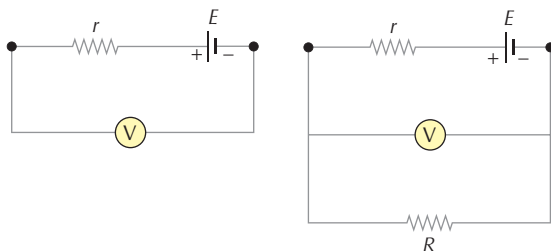
$$E_{el.} = 1,5 \cdot 1 \Rightarrow \boxed{E_{el.} = 1,5\text{ J}}$$

Resposta: 1,5 J

Observação:
Dizer que a fem de um gerador é 1,5 V equivale a dizer que o gerador gera 1,5 J de energia elétrica para cada carga elétrica de 1 C que a atravessa.

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

P. 193 Um gerador de fem 24 V e resistência interna 1 Ω está ligado a um circuito externo. A tensão entre os terminais do gerador é de 20 V.
a) Qual a intensidade da corrente elétrica que o atravessa?
b) Determine a potência gerada, a lançada no circuito e a dissipada internamente.
c) Qual o rendimento do gerador?

P. 194 A figura a seguir mostra dois circuitos montados com um gerador, um voltímetro ideal e um resistor de resistência $R = 10\ \Omega$. O voltímetro marca 6 V no primeiro circuito e 5 V no segundo. Calcule a fem E e a resistência interna r do gerador.

P. 195 Uma bateria possui fem 12 V. Calcule a energia que a bateria gera para cada elétron que a atravessa. (Dado: a carga elétrica elementar é $1,6 \cdot 10^{-19}$ C)

3 Curto-circuito em um gerador

Em um gerador, o **contato direto de seus terminais** constitui um **curto-circuito**. Esse contato pode ser obtido por um condutor de resistência desprezível (**fig. 6**). A tensão elétrica entre os terminais de um gerador em curto-circuito é nula ($U = 0$).

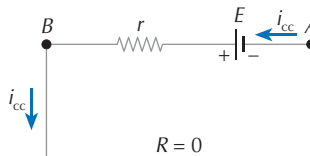



Figura 6. Gerador em curto-circuito.

Isso acontece porque os terminais A e B estão em contato direto. A intensidade da corrente de curto-circuito i_{cc} no gerador é obtida fazendo-se $U = 0$ na equação do gerador:

$$U = E - r \cdot i \Rightarrow 0 = E - r \cdot i_{cc} \Rightarrow \boxed{i_{cc} = \frac{E}{r}}$$

A intensidade da corrente de curto-circuito é a máxima intensidade de corrente elétrica que pode atravessar um gerador.

Sendo $U = 0$, a potência elétrica lançada no circuito será: $\boxed{Pot_\ell = U \cdot i = 0}$

Como $Pot_g = Pot_\ell + Pot_d$, temos: $\boxed{Pot_g = Pot_d}$

A potência elétrica total gerada será dissipada integralmente na resistência interna, podendo danificar o gerador.

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

R. 81 Uma bateria de automóvel tem fem 12 V e resistência interna 0,5 Ω. Determine a máxima intensidade de corrente elétrica que se pode obter dessa bateria.

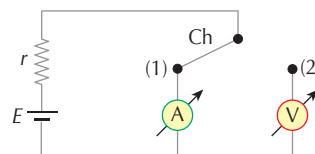
Solução:
A máxima intensidade de corrente elétrica que se pode obter na bateria ($E = 12$ V, $r = 0{,}5$ Ω) ocorre quando seus terminais estão em curto-circuito. Assim:

$$i_{cc} = \frac{E}{r} \Rightarrow i_{cc} = \frac{12}{0{,}5} \Rightarrow \boxed{i_{cc} = 24 \text{ A}}$$

Resposta: 24 A

R. 82 No circuito esquematizado, o gerador tem fem $E = 18$ V e resistência interna $r = 1{,}5$ Ω. O amperímetro A e o voltímetro V são ideais.

a) Estando a chave Ch na posição (1), qual a leitura do amperímetro?

b) Com a chave Ch na posição (2), qual a leitura do voltímetro?

Solução:

a) Com a chave na posição (1) o gerador fica em curto-circuito, pois o amperímetro é ideal (resistência elétrica nula). Assim, a leitura do amperímetro é a intensidade da corrente de curto-circuito:

$$i_{cc} = \frac{E}{r} \Rightarrow i_{cc} = \frac{18}{1{,}5} \Rightarrow \boxed{i_{cc} = 12 \text{ A}}$$

b) Com a chave na posição (2) a leitura do voltímetro é a própria fem E, pois o circuito não é percorrido por corrente elétrica (a resistência elétrica do voltímetro ideal é infinita). Portanto:

$$\boxed{U = E = 18 \text{ V}}$$

Resposta: a) 12 A; b) 18 V

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

P.196 Tem-se um gerador de fem 100 V e resistência interna 2 Ω. Calcule:

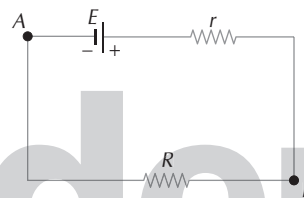
a) a ddp nos seus terminais quando não é percorrido por corrente elétrica;

b) a intensidade da corrente elétrica que o atravessa quando está em curto-circuito;

c) a ddp nos terminais nas condições do item anterior.

P.197 Um gerador de fem $E = 6$ V e resistência interna $r = 1$ Ω está ligado a um resistor R. Verifica-se que a tensão em R é de 4 V.

a) Determine a intensidade da corrente elétrica que atravessa o gerador.

b) Ligando os pontos A e B por meio de um fio de resistência nula, determine a nova intensidade da corrente elétrica que percorre o gerador.

4 Curva característica de um gerador

A equação de um gerador de constantes (E, r) é dada por:

$$U = E - r \cdot i = -r \cdot i + E$$

que é uma equação do 1º grau.

Na **figura 7** temos a curva característica de um gerador que expressa essa equação: uma reta de coeficiente angular $-r$, que corta o eixo das ordenadas ($i = 0$) quando o gerador está em circuito aberto ($U = E$). A reta encontra o eixo das abscissas ($U = 0$) quando o gerador está em curto-circuito $\left(i_{cc} = \frac{E}{r}\right)$.

Observe que a área do retângulo destacado é numericamente igual à potência elétrica lançada no circuito $Pot_\ell = U \cdot i$.

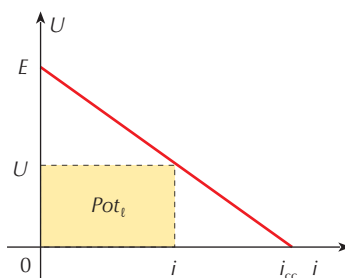
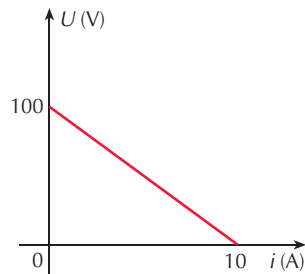



Figura 7. Curva característica de um gerador.

EXERCÍCIO RESOLVIDO

R. 83 Tem-se um gerador cuja curva característica é a reta da figura abaixo.

Calcule:

a) a fem E e a resistência interna r desse gerador;

b) a ddp nos terminais do gerador quando a corrente elétrica que o atravessa é 5 A;

c) a potência que o gerador lança nessas condições.

Solução:

a) Do gráfico, temos: $\boxed{E = 100\ \text{V}}$ e $i_{cc} = 10$ A

Como $i_{cc} = \dfrac{E}{r}$, vem: $10 = \dfrac{100}{r} \Rightarrow \boxed{r = 10\ \Omega}$

b) Quando $i = 5$ A, pela equação do gerador tem-se:

$$U = E - r \cdot i = 100 - 10 \cdot 5 \Rightarrow \boxed{U = 50\ \text{V}}$$

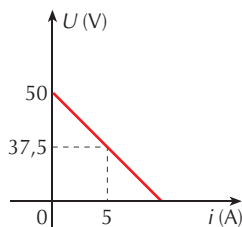
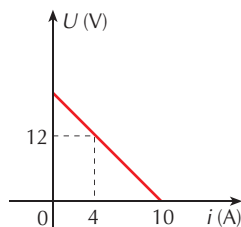
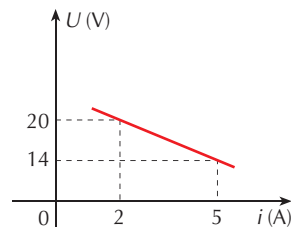
c) A potência lançada pelo gerador será:

$$Pot_\ell = U \cdot i \Rightarrow Pot_\ell = 50 \cdot 5 \Rightarrow \boxed{Pot_\ell = 250\ \text{W}}$$

Resposta: a) 100 V e 10 Ω; b) 50 V; c) 250 W

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

P. 198 Os gráficos abaixo representam as curvas características de geradores. Calcule a fem, a resistência interna e a corrente de curto-circuito de cada gerador.

I.

II.

III.

P. 199 Um gerador tem força eletromotriz 36 V e resistência interna 4,5 Ω.

a) Represente, num gráfico, a tensão U no gerador em função da intensidade da corrente elétrica i que o atravessa.

b) Qual a potência que o gerador lança no circuito externo quando sob tensão de 27 V?

Seção 9.2

Circuito simples. Lei de Pouillet

Objetivos

- Analisar um circuito gerador-resistor.
- Compreender a lei de Pouillet.

Termos e conceitos

- circuito simples

Circuito simples é aquele que apresenta apenas um caminho para a corrente elétrica, isto é, nenhum dos seus elementos possui ligações em paralelo. Estudaremos, inicialmente, o circuito gerador-resistor.

Na **figura 8** temos o circuito constituído pelo gerador (E, r), pelo resistor (R) e por fios de ligação de resistência elétrica desprezível.

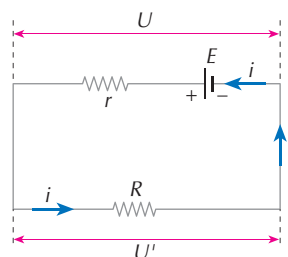



Figura 8. Circuito simples formado por um gerador e um resistor.

A diferença de potencial nos terminais do gerador ($U = E - r \cdot i$) é a mesma nos terminais do resistor ($U' = R \cdot i$).

Portanto:

$$U = U' \Rightarrow E - r \cdot i = R \cdot i \Rightarrow E = (R + r) \cdot i \Rightarrow \boxed{i = \frac{E}{R + r}}$$

A fórmula acima, a que chegamos por dedução teórica, foi estabelecida experimentalmente pelo físico Pouillet*, sendo chamada **lei de Pouillet**.

Observe que i é a intensidade da corrente elétrica que atravessa o gerador e o resistor, e R é a resistência externa do circuito. Essa resistência poderá ser a **resistência equivalente de uma associação qualquer de resistores**.

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

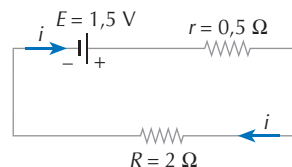
R. 84 Um resistor de 2 Ω é ligado aos terminais de uma pilha de fem 1,5 V e resistência interna 0,5 Ω. Determine:

a) a intensidade de corrente que se estabelece no circuito;

b) a energia elétrica dissipada no resistor em 1 minuto.

Solução:

a) Esquematizando o circuito conforme a figura ao lado, a lei de Pouillet fornece:

$$i = \frac{E}{R + r} \Rightarrow i = \frac{1,5}{2 + 0,5} \Rightarrow \boxed{i = 0,6\ A}$$

* **POUILLET**, Claude (1790-1868), físico e político francês, aperfeiçoou inúmeros aparelhos usados na Física, como a bússola, por exemplo. Estabeleceu, experimentalmente, a lei para determinar a intensidade de corrente em um circuito onde não existem ligações em paralelo.

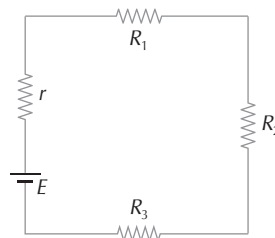
b) Calculemos inicialmente a potência elétrica dissipada no resistor:

$$Pot = R \cdot i^2 \Rightarrow Pot = 2 \cdot (0,6)^2 \Rightarrow Pot = 0,72\ W$$

A energia elétrica dissipada no resistor, em $\Delta t = 1$ min $= 60$ s, será:

$$E_{el.} = Pot \cdot \Delta t \Rightarrow E_{el.} = 0,72 \cdot 60 \Rightarrow \boxed{E_{el.} = 43,2\ J}$$

Resposta: a) 0,6 A; b) 43,2 J

R. 85 Um gerador de fem 9 V e resistência interna 1 Ω está ligado aos resistores de resistências $R_1 = R_2 = 2\ \Omega$ e $R_3 = 4\ \Omega$, conforme a figura. Qual a ddp no resistor de resistência R_3?

Solução:
A resistência externa do circuito vale:

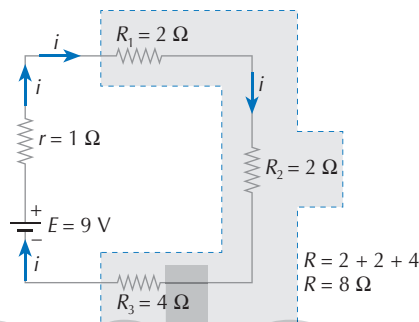
$R = R_1 + R_2 + R_3 \Rightarrow R = 2 + 2 + 4 \Rightarrow R = 8\ \Omega$

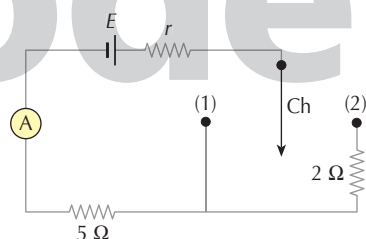
A lei de Pouillet fornece:

$i = \dfrac{E}{R + r} \Rightarrow i = \dfrac{9}{8 + 1} \Rightarrow i = 1\ A$

Pela lei de Ohm:

$U_3 = R_3 \cdot i \Rightarrow U_3 = 4 \cdot 1 \Rightarrow \boxed{U_3 = 4\ V}$

Resposta: 4 V

R. 86 No circuito da figura, com a chave Ch na posição (1), o amperímetro ideal (A) indica 0,75 A. Passada a chave Ch para a posição (2), o amperímetro passa a indicar 0,60 A. Determine a fem E e a resistência interna *r* da bateria.

E, r, A, (1), Ch, (2), 2 Ω, 5 Ω

Solução:
Com a chave Ch na posição (1), conforme figura I, a resistência externa do circuito vale $R_1 = 5\ \Omega$.
Sendo $i_1 = 0,75$ A, pela lei de Pouillet:

$i_1 = \dfrac{E}{R_1 + r} \Rightarrow 0,75 = \dfrac{E}{5 + r} \Rightarrow E = 0,75 \cdot (5 + r)$ ①

Figura I.

Na posição (2), conforme figura II, tem-se $i_2 = 0,60$ A e $R_2 = 7\ \Omega$ e, como $i_2 = \dfrac{E}{R_2 + r}$, vem:

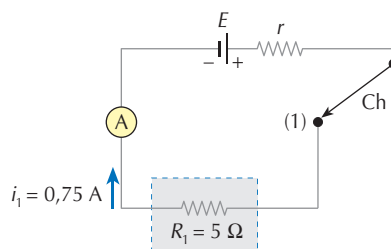
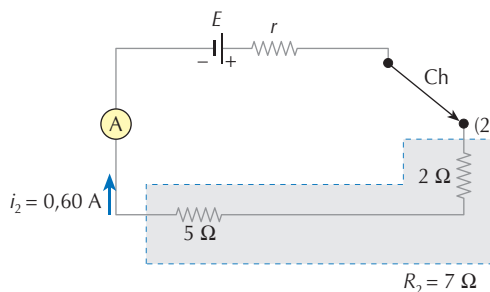
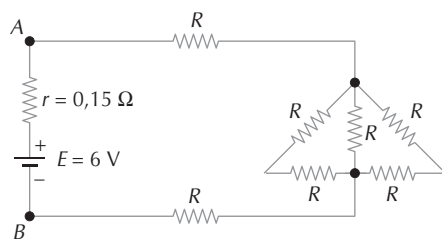
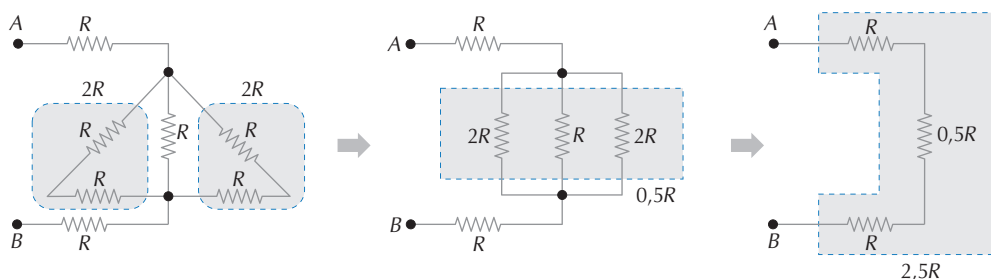
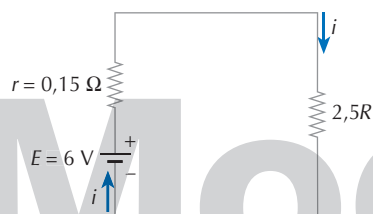
$$0,60 = \frac{E}{7 + r} \Rightarrow E = 0,60\ (7 + r) \quad ②$$

Igualando ① e ②, temos:

$0,75 \cdot (5 + r) = 0,60 \cdot (7 + r) \Rightarrow \boxed{r = 3\ \Omega}$

Substituindo esse valor em ①, obtemos: $\boxed{E = 6\ V}$

Figura II.

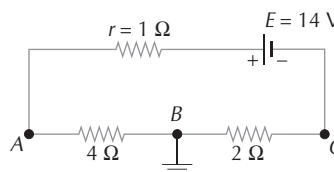
Resposta: 6 V e 3 Ω

R. 87 No circuito abaixo, a potência dissipada na resistência interna do gerador é 15 W. Calcule o valor da resistência elétrica *R*.

Solução:
Resolvendo a associação de resistores entre *A* e *B*, determinamos a resistência equivalente externa do circuito.

O novo esquema do circuito está representado abaixo.

Como a potência dissipada na resistência interna do gerador é $Pot_d = 15$ W, temos:

$$Pot_d = r \cdot i^2 \Rightarrow 15 = 0{,}15 \cdot i^2 \Rightarrow i^2 = 100 \Rightarrow i = 10 \text{ A}$$

Pela lei de Pouillet:

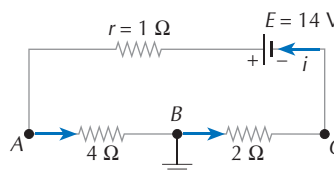
$$i = \frac{E}{R_{ext.} + r} \Rightarrow 10 = \frac{6}{2{,}5R + 0{,}15} \Rightarrow 25R + 1{,}5 = 6 \Rightarrow 25R = 4{,}5 \Rightarrow \boxed{R = 0{,}18\ \Omega}$$

Resposta: 0,18 Ω

R. 88 O ponto *B* do circuito está ligado à terra ($V_B = 0$). Determine os potenciais elétricos dos pontos *A* e *C*.

Solução:
A resistência externa do circuito será:

$$R = R_{AB} + R_{BC} = 6\ \Omega$$

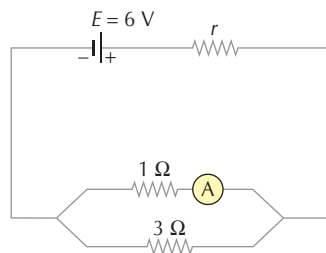
Segundo a lei de Pouillet:

$$i = \frac{E}{R + r} = \frac{14}{6 + 1} = \frac{14}{7} \Rightarrow i = 2 \text{ A}$$

Pela lei de Ohm:

$$\begin{cases} V_A - V_B = R_{AB} \cdot i \Rightarrow V_A - 0 = 4 \cdot 2 \Rightarrow \boxed{V_A = 8 \text{ V}} \\ V_B - V_C = R_{BC} \cdot i \Rightarrow 0 - V_C = 2 \cdot 2 \Rightarrow \boxed{V_C = -4 \text{ V}} \end{cases}$$

Resposta: $V_A = 8$ V e $V_C = -4$ V

V3_P1_UN_B_CAP_09a.indd 212 17.09.09 18:14:21

R. 89 A indicação do amperímetro ideal do circuito da figura é 5 A. Calcule a resistência interna r do gerador.

Solução:

Sendo $i_1 = 5$ A no resistor $R_1 = 1\ \Omega$, pela lei de Ohm:

$$U_{MN} = R_1 \cdot i_1 \Rightarrow U_{MN} = 1 \cdot 5 \Rightarrow U_{MN} = 5\text{ V}$$

Como o resistor $R_2 = 3\ \Omega$ está associado em paralelo com R_1, temos:

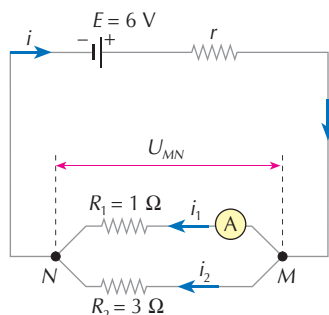
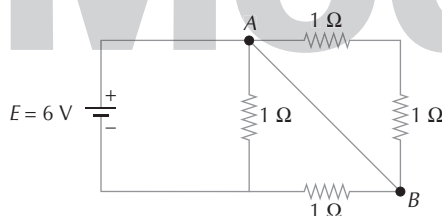
$$i_2 = \frac{U_{MN}}{R_2} = \frac{5}{3} \Rightarrow i_2 = \frac{5}{3}\text{ A}$$

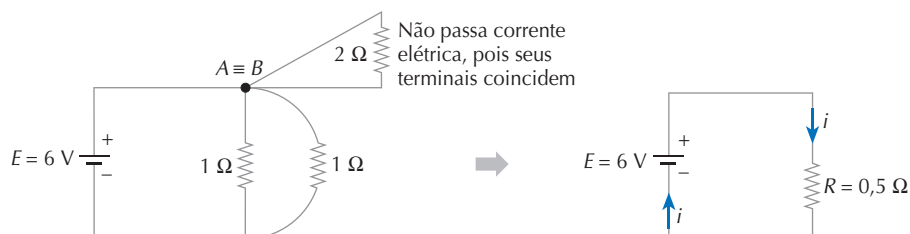
No nó N:

$$i = i_1 + i_2 \Rightarrow i = 5 + \frac{5}{3} \Rightarrow i = \frac{20}{3}\text{ A}$$

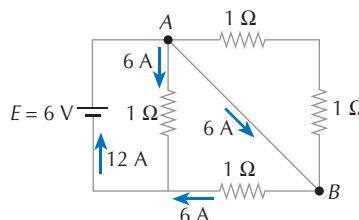
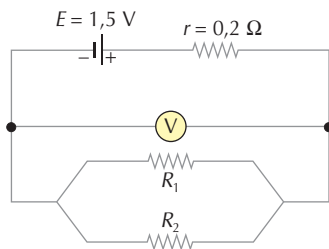
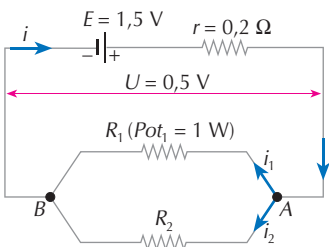
Pela equação do gerador, vem:

$$U_{MN} = E - r \cdot i \Rightarrow 5 = 6 - r \cdot \frac{20}{3} \Rightarrow \frac{20}{3} \cdot r = 1 \Rightarrow r = \frac{3}{20} \Rightarrow \boxed{r = 0{,}15\ \Omega}$$

Resposta: 0,15 Ω

R. 90 No circuito, a bateria tem fem E = 6 V e resistência interna desprezível. Calcule a intensidade de corrente elétrica que passa pelo fio *AB* de resistência nula.

Solução:

Modificamos o esquema do circuito, coincidindo A e B, pois esses pontos estão ligados por um fio de resistência nula.

Sendo $i = \frac{E}{R} = \frac{6}{0{,}5}$, vem $i = 12$ A.

Em cada resistor de 1 Ω passará corrente elétrica de intensidade 6 A, que será também a intensidade da corrente elétrica no fio *AB*.

Resposta: 6 A

R. 91 Liga-se o gerador de fem $E = 1{,}5$ V e resistência interna $r = 0{,}2\ \Omega$ à associação de resistores em paralelo da figura. A indicação do voltímetro V (ideal) é 0,5 volt e a potência dissipada em R_1 é 1 W. Calcule os valores de R_1 e R_2.

Solução:
No esquema abaixo, colocamos os dados do exercício.

No gerador:
$U = E - r \cdot i \Rightarrow 0{,}5 = 1{,}5 - 0{,}2 \cdot i \Rightarrow 0{,}2 \cdot i = 1 \Rightarrow i = 5\text{ A}$
No resistor R_1: $Pot_1 = U \cdot i_1 \Rightarrow 1 = 0{,}5 \cdot i_1 \Rightarrow i_1 = 2\text{ A}$
No nó A: $i = i_1 + i_2 \Rightarrow 5 = 2 + i_2 \Rightarrow i_2 = 3\text{ A}$
Estando R_1 e R_2 em paralelo, a ddp U nos dois resistores será a mesma e, pela lei de Ohm:

$$R_1 = \frac{U}{i_1} = \frac{0{,}5}{2} \Rightarrow \boxed{R_1 = 0{,}25\ \Omega}$$

$$R_2 = \frac{U}{i_2} = \frac{0{,}5}{3} \Rightarrow \boxed{R_2 \simeq 0{,}17\ \Omega}$$

Resposta: $R_1 = 0{,}25\ \Omega$ e $R_2 \simeq 0{,}17\ \Omega$

R. 92 Aos circuitos representados estão ligados os voltímetros V_1 e V_2, idênticos, com resistência elétrica 10 megaohms ($1\ \text{M}\Omega = 10^6\ \Omega$). A resistência interna do gerador é desprezível. Determine as indicações de V_1 e V_2.

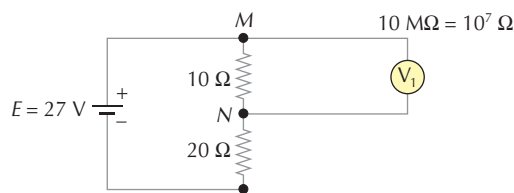
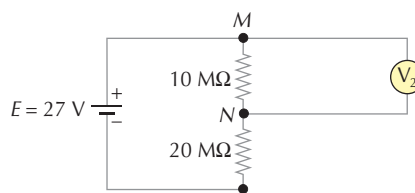



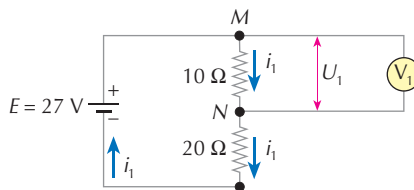
Figura I. Figura II.

Solução:
No circuito da figura I, a resistência do voltímetro V_1 pode ser considerada infinita ($10^7\ \Omega$ é muitas vezes maior que $10\ \Omega$) em relação às resistências do circuito. Portanto, pode-se concluir que não será percorrida por corrente elétrica. A resistência equivalente do circuito será:

$R_1 = 10\ \Omega + 20\ \Omega = 30\ \Omega$

$$i_1 = \frac{E}{R_1} = \frac{27}{30} \Rightarrow i_1 = 0{,}9\text{ A}$$

A indicação de V_1 será:
$U_1 = R_{MN} \cdot i_1$
$U_1 = 10 \cdot 0{,}9$

$\boxed{U_1 = 9\text{ V}}$

No circuito da figura II, a resistência do voltímetro V_2 é comparável à do circuito. Assim, V_2 será percorrido por corrente, pois entre *M* e *N* as duas resistências são iguais. A resistência equivalente do circuito será:

$R_2 = 5 + 20 \Rightarrow R_2 = 25\ \text{M}\Omega \Rightarrow R_2 = 25 \cdot 10^6\ \Omega$

$i_2 = \dfrac{E}{R_2} = \dfrac{27\ \text{V}}{25\ \text{M}\Omega} = \dfrac{27\ \text{V}}{25 \cdot 10^6\ \Omega} = \dfrac{27}{25} \cdot 10^{-6}\ \text{A}$

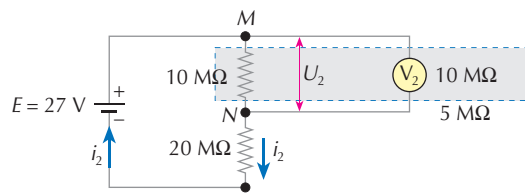
$i_2 = \dfrac{27}{25}\ \mu\text{A}$

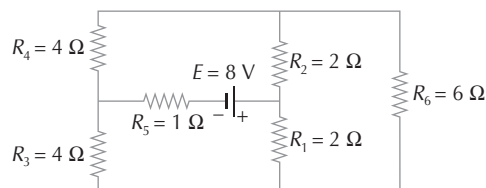
A indicação de V_2 será:

$U_2 = R'_{MN} \cdot i_2$

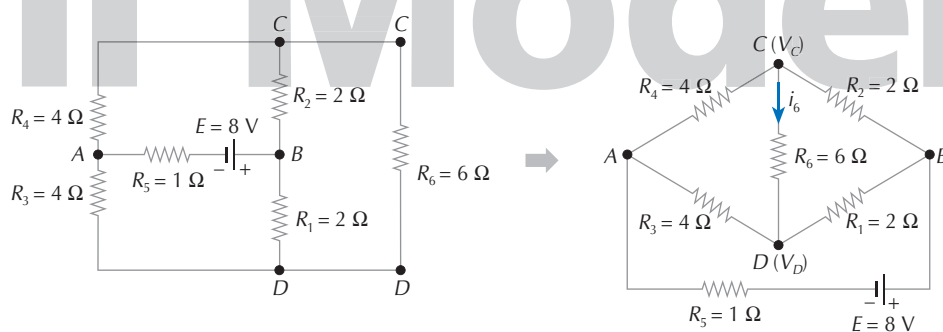
$U_2 = 5\ \text{M}\Omega \cdot \dfrac{27}{25}\ \mu\text{A}$

$U_2 = 5 \cdot 10^6\ \Omega \cdot \dfrac{27}{25} \cdot 10^{-6}\ \text{A}$

$\boxed{U_2 = 5{,}4\ \text{V}}$

Resposta: $U_1 = 9\ \text{V}$ e $U_2 = 5{,}4\ \text{V}$

R. 93 No circuito da figura abaixo, calcule:

a) a ddp no resistor de resistência R_6; b) a potência dissipada em cada um dos resistores.

Solução:

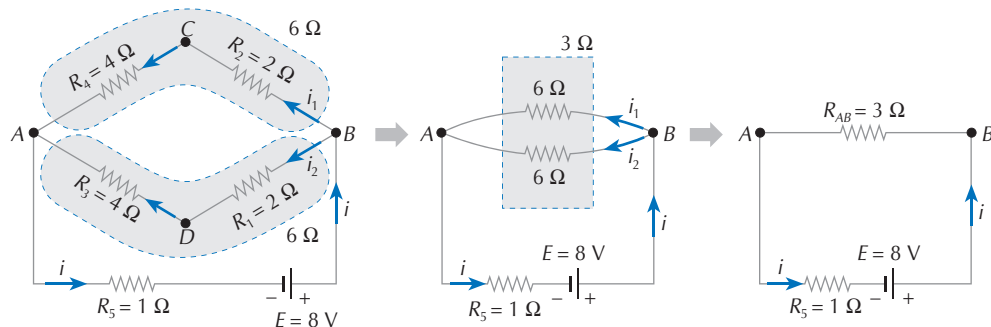
a) O circuito dado é uma ponte de Wheatstone:

Os produtos das resistências opostas são iguais: $R_1R_4 = R_2R_3$ $(2 \cdot 4 = 2 \cdot 4)$

Disso decorre:

$V_C = V_D \Rightarrow V_C - V_D = 0 \Rightarrow \boxed{U_{CD} = 0}$

Portanto, não passa corrente no resistor $R_6 = 6\ \Omega$, ou seja, $i_6 = 0$.

b) O resistor de resistência R_6 pode, então, ser retirado do esquema do circuito, e assim obtemos:

V3_P1_UN_B_CAP_09a.indd 215 17.09.09 18:14:24

Pela lei de Pouillet: $i = \frac{E}{R_{AB} + R_5} \Rightarrow i = \frac{8}{4} \Rightarrow i = 2\ A$

Sendo $i_1 = i_2 = \frac{i}{2}$, vem: $i_1 = i_2 = 1\ A$

Assim, temos as seguintes potências dissipadas nos resistores:

$$Pot_1 = R_1 \cdot i_2^2 = (2) \cdot (1)^2 \Rightarrow \boxed{Pot_1 = 2\ W}$$

$$Pot_2 = R_2 \cdot i_1^2 = (2) \cdot (1)^2 \Rightarrow \boxed{Pot_2 = 2\ W}$$

$$Pot_3 = R_3 \cdot i_2^2 = (4) \cdot (1)^2 \Rightarrow \boxed{Pot_3 = 4\ W}$$

$$Pot_4 = R_4 \cdot i_1^2 = (4) \cdot (1)^2 \Rightarrow \boxed{Pot_4 = 4\ W}$$

$$Pot_5 = R_5 \cdot i^2 = (1) \cdot (2)^2 \Rightarrow \boxed{Pot_5 = 4\ W}$$

$$Pot_6 = R_6 \cdot i_6^2 = (6) \cdot (0)^2 \Rightarrow \boxed{Pot_6 = 0\ W}$$

Resposta: a) zero; b) 2 W; 2 W; 4 W; 4 W; 4 W; 0 W

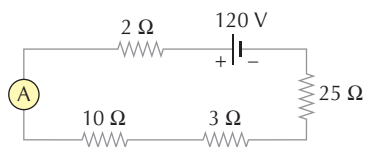
Entre na rede Nos endereços eletrônicos http://br.geocities.com/saladefisica3/laboratorio/serie/serie.htm e http://br.geocities.com/saladefisica3/laboratorio/paralelo/paralelo.htm (acesso em julho/2009), você pode simular as leituras de um amperímetro e de um voltímetro em circuitos com resistores ligados em série e em paralelo, respectivamente.

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

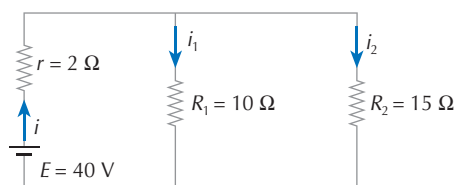
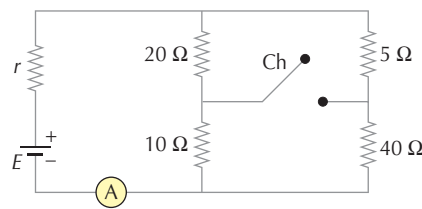
P. 200 Uma bateria de fem 6 V e de resistência interna 2 Ω é ligada a um resistor de 10 Ω.

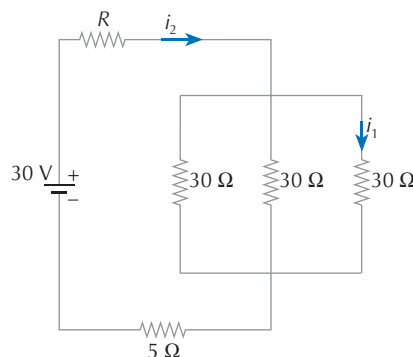
a) Calcule a corrente elétrica que se estabelece no circuito.

b) Determine a energia elétrica transformada em térmica no resistor em 1 minuto.

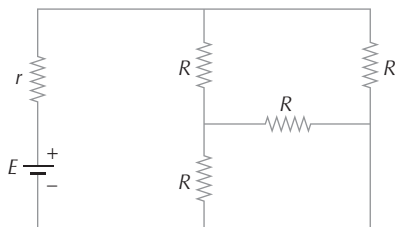
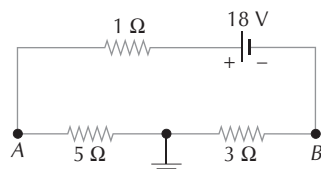
P. 201 Dado o circuito da figura, determine a indicação do amperímetro ideal A.

P. 202 Para o circuito da figura, calcule:

a) as intensidades das correntes elétricas i, i_1 e i_2;

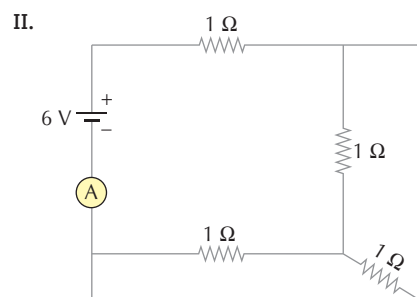
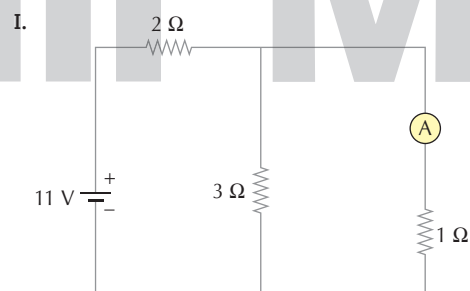
b) a potência elétrica dissipada no circuito externo.

P. 203 Com a chave Ch aberta, o amperímetro ideal (A) do circuito indica 0,75 A. Fechando Ch, a indicação do amperímetro passa a ser 1 A. Calcule a fem E e a resistência interna r do gerador.

P. 204 (FEI-SP) No circuito da figura, calcule:

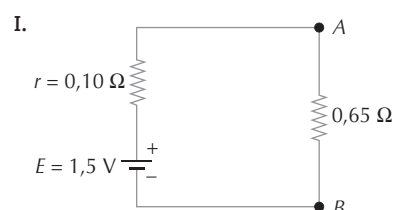
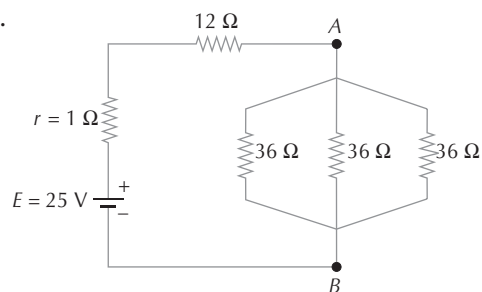
a) o valor da resistência R para que a corrente i_2 seja 2 A;

b) a corrente i_1.

P. 205 (EEM-SP) Um gerador de fem $E = 1{,}5$ V e resistência interna $r = 0{,}50\ \Omega$ é ligado a uma associação de três resistores iguais, de resistência $R = 2{,}4\ \Omega$ cada um. Calcule a potência fornecida pelo gerador aos resistores quando a associação deles é:
a) em série; **b)** em paralelo.

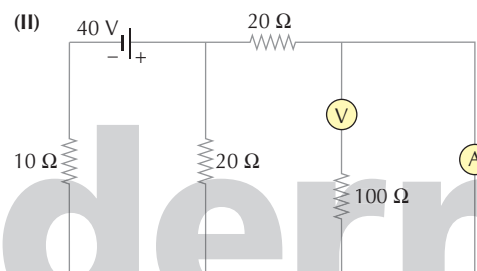
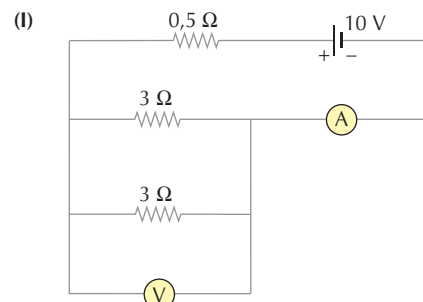
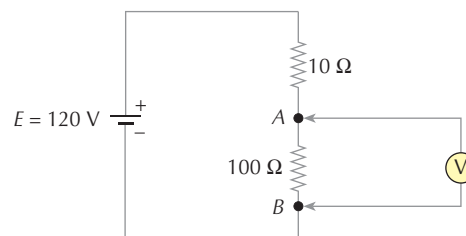
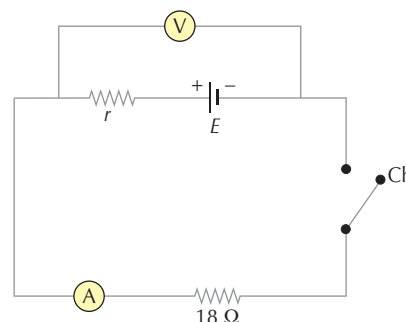
P. 206 No circuito da figura, o gerador tem fem $E = 1{,}4$ V e resistência interna $r = 2\ \Omega$, e todos os resistores $R = 20\ \Omega$. Calcule a potência elétrica total dissipada por efeito Joule.

P. 207 Dado o circuito da figura, determine os potenciais elétricos dos pontos *A* e *B*.

P. 208 Nos circuitos I e II representados, os geradores têm resistências internas desprezíveis. Calcule as indicações do amperímetro ideal A.

I.

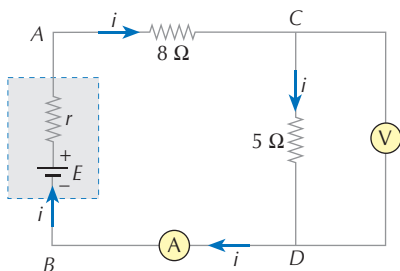
II.

P. 209 Nos circuitos a seguir, um voltímetro ideal é ligado aos pontos A e B. Determine as suas indicações.

I.

II.

P. 210 Os aparelhos de medida A e V dos circuitos abaixo são ideais. Calcule suas leituras.

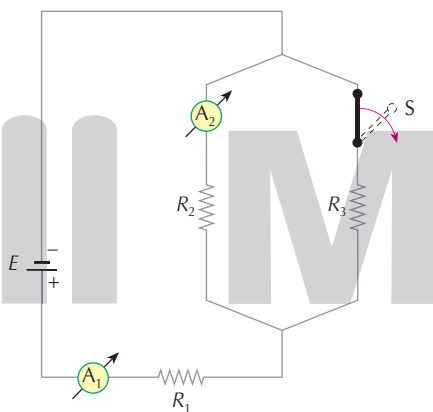
(I)

(II)

P. 211 No circuito abaixo mede-se a ddp entre os pontos A e B com um voltímetro (V) de resistência interna 100 Ω. Determine a leitura registrada no voltímetro.

P. 212 (UFC-CE) Quando o circuito visto na figura está aberto, o voltímetro V indica 2 volts. Fechada a chave Ch, a leitura do amperímetro A é 0,1 ampère. Calcule, em ohms, a resistência interna da bateria, admitindo que os instrumentos sejam ideais.

P. 213 Na figura, *AB* representa um gerador de resistência interna $r = 2\ \Omega$. O amperímetro (A) e o voltímetro (V) são instrumentos considerados ideais. O voltímetro marca 30 V. Pede-se:

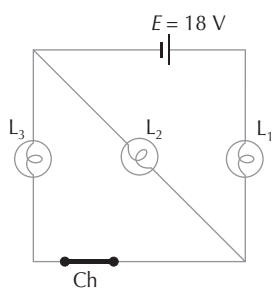
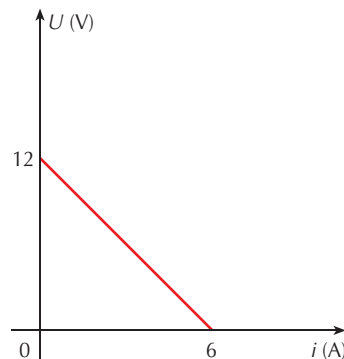
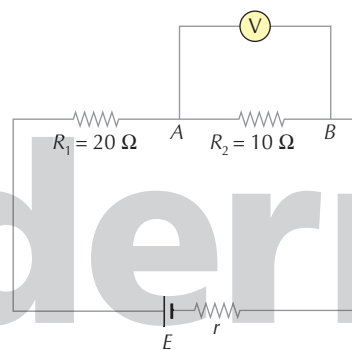
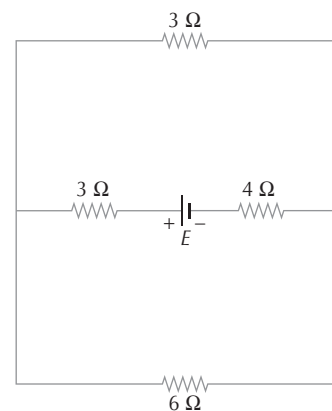
a) a intensidade da corrente elétrica marcada pelo amperímetro;

b) a corrente de curto-circuito do gerador.

P. 214 (Fuvest-SP) No circuito da figura, cada um dos três resistores tem 50 ohms.

a) Com a chave S fechada, o amperímetro A_2 indica uma intensidade de corrente $i_2 = 0{,}5$ A. Qual a indicação do amperímetro A_1?

b) Calcule e compare as indicações de A_1 e A_2 quando a chave S está aberta. Explique.

P. 215 (Fuvest-SP) No circuito, as lâmpadas L_1, L_2 e L_3 são idênticas, com resistências de 30 Ω cada. A força eletromotriz do gerador ideal vale 18 V e Ch é uma chave inicialmente fechada.

a) Qual a corrente que passa por L_2?

b) Abrindo a chave Ch, o que acontece com o brilho da lâmpada L_1? Justifique.

P. 216 O gráfico representa a curva característica de um gerador. Liga-se aos seus terminais um resistor de 6 Ω. Determine a potência dissipada no resistor.

P. 217 No circuito, as resistências R_1 e R_2 valem, respectivamente, 20 Ω e 10 Ω. Determine o valor, em watts, da potência dissipada pela bateria de força eletromotriz $E = 32$ V, se um voltímetro ideal (V), quando ligado entre os pontos *A* e *B*, acusa uma leitura de 10 volts.

P. 218 (ITA-SP) Dado o circuito da figura, determine a máxima fem *E* da pilha para que a potência dissipada em qualquer das resistências não ultrapasse 4 W.

V3_P1_UN_B_CAP_09a.indd 218 17.09.09 18:14:29

Seção 9.3

Associação de geradores

Objetivos

- Analisar a associação de geradores em série.
- Compreender como obter a força eletromotriz e a resistência interna do gerador equivalente em uma associação em série.
- Analisar a associação de geradores em paralelo.
- Compreender como obter a força eletromotriz e a resistência interna do gerador equivalente em uma associação em paralelo.

Os geradores podem ser associados, assim como os resistores, em **série** e em **paralelo**.

> **Gerador equivalente** à associação é aquele que, percorrido pela corrente elétrica da associação, mantém entre seus terminais uma ddp igual àquela mantida pela associação.

1 Associação em série

Na **associação em série**, o polo positivo de cada gerador é ligado ao polo negativo do seguinte, de modo que **todos os geradores são percorridos pela mesma corrente elétrica**.

Na **figura 9**, representam-se dois geradores de fems E_1 e E_2 e resistências internas r_1 e r_2 associados em série. O gerador equivalente tem fem E_s e resistência interna r_s.

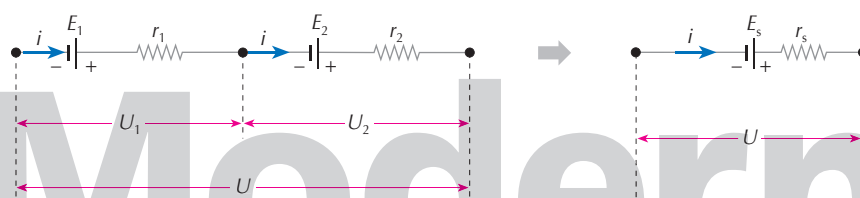



Figura 9. Associação de geradores em série.

Nos geradores associados em série temos:

$$U_1 = E_1 - r_1 \cdot i \qquad \text{e} \qquad U_2 = E_2 - r_2 \cdot i$$

Assim:

$$U_1 + U_2 = E_1 + E_2 - (r_1 + r_2) \cdot i \Rightarrow U = E_1 + E_2 - (r_1 + r_2) \cdot i \quad ①$$

No gerador equivalente temos:

$$U = E_s - r_s \cdot i \quad ②$$

Sabendo que ① e ② devem ser iguais para qualquer valor de i, obtemos:

$$r_s = r_1 + r_2 \qquad \text{e} \qquad E_s = E_1 + E_2$$

Essas fórmulas podem ser aplicadas a um número qualquer de geradores. Em particular, para n geradores iguais, cada um com fem E e resistência interna r, temos:

$$r_s = nr \qquad \text{e} \qquad E_s = nE$$

Podemos observar que nessa associação há um aumento da força eletromotriz, mas, por outro lado, há também um aumento da resistência interna, o que não é interessante, pois há maior dissipação de energia elétrica na associação.

2 Associação em paralelo

Na **associação em paralelo**, os polos positivos dos geradores são ligados entre si, assim como os polos negativos.

Vamos analisar o caso em que os geradores são iguais, isto é, têm mesma fem e mesma resistência interna. No exercício **R. 105**, veremos a razão **de não analisarmos a associação em paralelo de geradores de forças eletromotrizes diferentes**.

Consideremos, então, n geradores iguais de fem E e resistência interna r. Associemos os geradores em paralelo, ligando os polos positivos entre si e também os polos negativos (**fig. 10**).

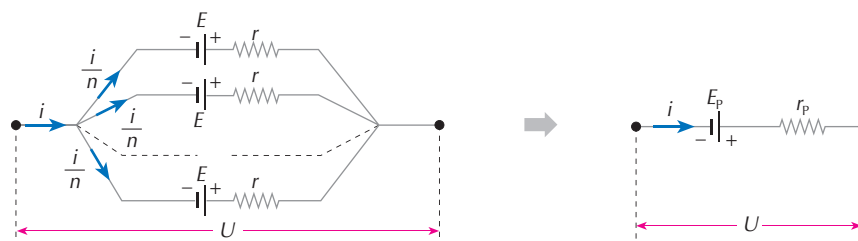



Figura 10. Associação de geradores em paralelo.

Todos os geradores mantêm a **mesma ddp** U, sendo que a **corrente elétrica** i **se "distribui" igualmente entre eles**, isto é, em cada gerador associado, a intensidade de corrente será $\frac{i}{n}$. A partir da equação do gerador obtemos, em cada um:

$$U = E - r \cdot \left(\frac{i}{n}\right) = E - \left(\frac{r}{n}\right) \cdot i$$

e no gerador equivalente: $U = E_p - r_p \cdot i$

Portanto, comparando as duas expressões de U, obtemos: $r_p = \frac{r}{n}$ e $E_p = E$

Podemos observar que nessa associação se consegue uma diminuição da resistência interna e cada gerador só é percorrido pela enésima parte da corrente elétrica que atravessa a associação. Contudo, a fem equivalente da associação permanece igual à fem de qualquer um dos geradores associados.

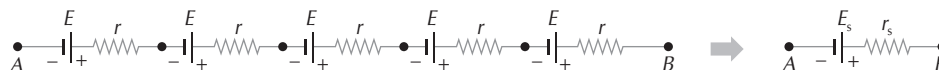
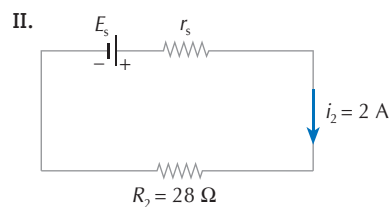
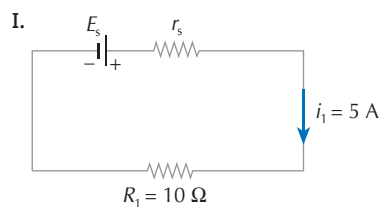
Medidas da força eletromotriz: ① de uma pilha em circuito aberto; ② de uma associação de duas pilhas idênticas em série; ③ de uma associação de duas pilhas idênticas em paralelo.

Numa lanterna comum, as pilhas são associadas em série.

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

R. 94 Uma associação de 5 baterias iguais, em série, fornece a um resistor de 10 Ω uma corrente de 5 A, ou a um resistor de 28 Ω uma corrente de 2 A. Calcule a fem E e a resistência interna r de cada bateria.

Solução:
Seja E a fem e r a resistência interna de cada bateria. A associação em série dessas 5 baterias vale:

$$E_s = 5E \quad \text{e} \quad r_s = 5r$$

Teremos os seguintes circuitos:

No circuito I, pela lei de Pouillet:

$$i_1 = \frac{E_s}{R_1 + r_s} \Rightarrow 5 = \frac{5E}{10 + 5r} \Rightarrow 5E = 50 + 25r \quad ①$$

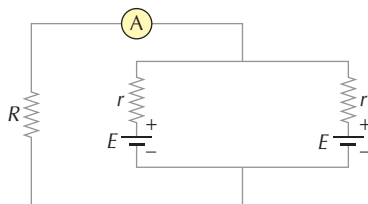
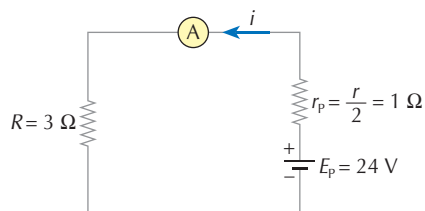
No circuito II, a lei de Pouillet fornece:

$$i_2 = \frac{E_s}{R_2 + r_s} \Rightarrow 2 = \frac{5E}{28 + 5r} \Rightarrow 5E = 56 + 10r \quad ②$$

Igualando ① e ②, vem: $50 + 25r = 56 + 10r \Rightarrow 15r = 6 \Rightarrow \boxed{r = 0{,}4\ \Omega}$

De ①, temos: $5E = 50 + 25 \cdot 0{,}4 \Rightarrow 5E = 60 \Rightarrow \boxed{E = 12\ \text{V}}$

Resposta: 12 V; 0,4 Ω

R. 95 Dois geradores iguais, cada um com fem $E = 24$ V e resistência interna $r = 2$ Ω, são associados como indica a figura abaixo. A resistência R vale 3 Ω. Determine a indicação do amperímetro (A) ideal.

Solução:
Determinando o gerador equivalente da associação em paralelo, o esquema do circuito será:

Assim:

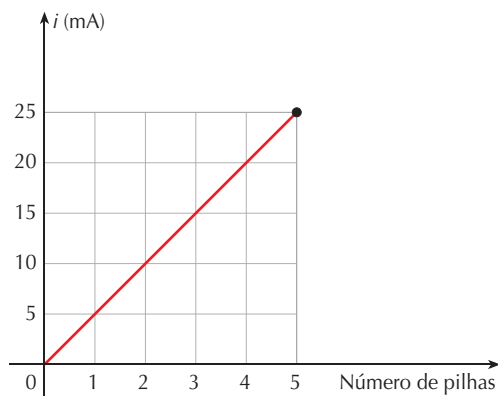
$$i = \frac{E_P}{R + r_P} = \frac{24}{4} \Rightarrow \boxed{i = 6\ \text{A}}$$

Resposta: 6 A

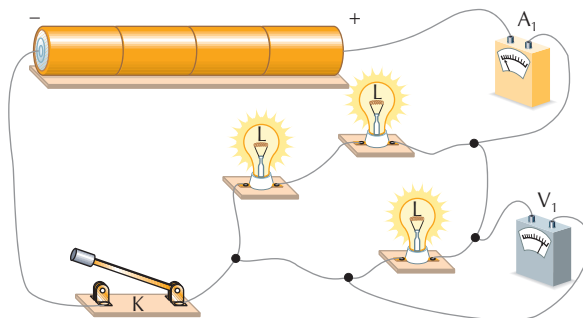
EXERCÍCIOS PROPOSTOS

P. 219 Um rádio utiliza 4 pilhas de fem 1,5 V e resistência interna 0,2 Ω cada uma. Considerando-se que as pilhas estão associadas em série, determine a fem e a resistência interna equivalentes.

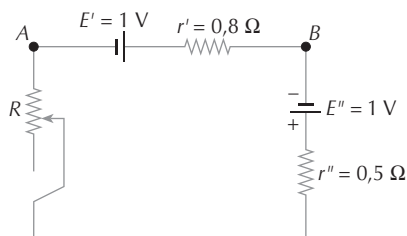
P. 220 Tem-se uma associação de três bateriais iguais, cada uma de 12 V e resistência interna 1,2 Ω, em paralelo. Calcule a fem e a resistência interna equivalentes.

P. 221 (Vunesp) O gráfico representa a intensidade da corrente *i* que atravessa um resistor de resistência *R* quando alimentado por pilhas ligadas em série. Se a fem de cada pilha (com resistência interna desprezível) é 1,5 V, qual o valor da resistência *R*?

P. 222 (PUC-SP) No circuito representado, as lâmpadas L são ôhmicas na faixa de tensão em que são utilizadas e têm a inscrição 6 V — 12 W. As pilhas têm fem de 1,5 V e resistência interna desprezível, e os medidores são ideais.

a) Faça um esquema do circuito.

b) Determine as leituras do amperímetro A_1 e do voltímetro V_1, após a ligação da chave K (despreze fenômenos transitórios).

P. 223 Cinco geradores, cada um de fem 4,5 V e corrente de curto-circuito igual a 0,5 A, são associados em paralelo. Determine a fem e a resistência interna do gerador equivalente.

P. 224 (Univap-SP) Dado o circuito da figura a seguir, determine o valor da resistência *R* do reostato, que anula a ddp entre os pontos *A* e *B*.

Estudo gráfico da potência elétrica lançada por um gerador em um circuito

Objetivos

- Analisar o gráfico da potência lançada pelo gerador em função da intensidade de corrente elétrica.
- Conhecer a intensidade de corrente e a ddp nos terminais do gerador, em condições de potência máxima lançada.
- Relacionar a potência máxima lançada por um gerador com sua fem e com sua resistência interna.

Termos e conceitos

- ânodo
- cátodo
- eletrólito

Consideremos um gerador, de constantes (E, r), que está fornecendo energia a um aparelho elétrico qualquer (**fig. 11**). A potência elétrica lançada pelo gerador é $Pot_\ell = U \cdot i$, e, de acordo com a equação do gerador $U = E - r \cdot i$, obtemos:

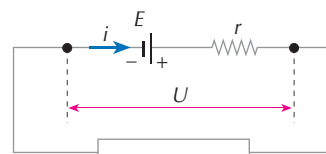



Figura 11. Gerador fornecendo energia a um aparelho elétrico qualquer.

$$Pot_\ell = E \cdot i - r \cdot i^2$$

que é uma equação do 2º grau.

O gráfico de $Pot_\ell = f(i)$ é uma parábola cuja concavidade está voltada para baixo (**fig. 12**). Essa parábola encontra o eixo das abscissas quando $Pot_\ell = 0$. Impondo-se essa condição, obtemos os dois valores da corrente elétrica, para os quais o gerador não lança potência ao circuito externo:

$$Pot_\ell = 0 \Rightarrow E \cdot i - r \cdot i^2 = 0 \Rightarrow$$
$$\Rightarrow i \cdot (E - r \cdot i) = 0 \Rightarrow$$
$$\Rightarrow i = 0 \text{ ou } E - r \cdot i = 0$$

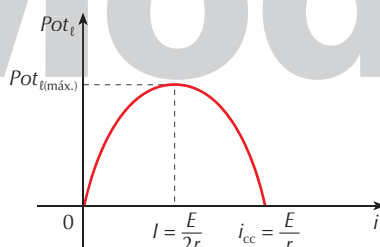



Figura 12. Gráfico da potência lançada pelo gerador em função da intensidade de corrente.

A situação $i = 0$ corresponde fisicamente ao gerador em circuito aberto.

Para $E - r \cdot i = 0$, temos $i = \frac{E}{r} = i_{cc}$, que corresponde ao gerador em curto-circuito.

Indicando por I o valor da intensidade de corrente elétrica que torna máxima a potência elétrica lançada, devido à simetria do gráfico, podemos concluir:

$$I = \frac{i_{cc}}{2} = \frac{E}{2r}$$

Isso significa que:

Um gerador lança a potência elétrica máxima quando é percorrido por metade da corrente de curto-circuito.

Nessas condições, a ddp $U = E - r \cdot I$, com $I = \frac{E}{2r}$, nos terminais do gerador, é:

$$U = E - r \cdot \frac{E}{2r} = E - \frac{E}{2} \Rightarrow \boxed{U = \frac{E}{2}}$$

Podemos concluir então que:

Quando um gerador lança a potência elétrica máxima, a ddp, nos seus terminais, é igual à metade de sua fem.

A potência elétrica máxima que o gerador lança vale:

$$Pot_{\ell(\text{máx.})} = U \cdot i = \frac{E}{2} \cdot \frac{E}{2r} \Rightarrow \boxed{Pot_{\ell(\text{máx.})} = \frac{E^2}{4r}}$$

sendo, portanto, uma constante do gerador.

O rendimento elétrico do gerador, quando lança a potência máxima, é igual a:

$$\eta = \frac{U}{E} = \frac{\frac{E}{2}}{E} = \frac{1}{2} = 0{,}5 \Rightarrow \boxed{\eta = 50\%}$$

Se o aparelho ligado aos terminais do gerador for um resistor de resistência R (**fig. 13**), pela lei de Pouillet, obtemos:

$$I = \frac{E}{R + r} = \frac{E}{2r} \Rightarrow R + r = 2r \Rightarrow \boxed{R = r}$$

Assim, dado um circuito formado apenas por um gerador e um resistor, o gerador lança potência elétrica máxima quando a resistência externa do circuito é igual à resistência interna do gerador.

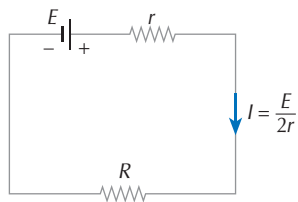



Figura 13. Neste circuito, o gerador lança a potência máxima quando $R = r$.

Observe que existem quatro constantes para o gerador: E, r, i_{cc} e $Pot_{\ell(\text{máx.})}$

Entretanto, um gerador pode ser apresentado por apenas duas dessas constantes, pois, mediante as equações $I_{cc} = \frac{E}{r}$ e $Pot_{\ell(\text{máx.})} = \frac{E^2}{4r}$, poderemos obter as outras duas.

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

R. 96 Um gerador de fem $E = 100$ V e resistência interna $r = 1\ \Omega$ deve fornecer energia $2{,}5 \cdot 10^4$ J. Calcule o tempo mínimo necessário.

Solução:

De $Pot_\ell = \dfrac{E_{el.}}{\Delta t}$, sendo a energia fornecida $E_{el.} = 2{,}5 \cdot 10^4$ J constante, resulta que para Δt mínimo deve-se ter Pot_ℓ máximo. No gerador de $E = 100$ V e $r = 1\ \Omega$, a potência lançada máxima é:

$$Pot_{\ell(máx.)} = \frac{E^2}{4r} \Rightarrow Pot_{\ell(máx.)} = \frac{(100)^2}{4 \cdot 1} \Rightarrow Pot_{\ell(máx.)} = 2{,}5 \cdot 10^3\ \text{W}$$

Então:

$$Pot_{\ell(máx.)} = \frac{E_{el.}}{\Delta t_{mín.}} \Rightarrow \Delta t_{mín.} = \frac{E_{el.}}{Pot_{\ell(máx.)}} \Rightarrow \Delta t_{mín.} = \frac{2{,}5 \cdot 10^4}{2{,}5 \cdot 10^3} \Rightarrow \boxed{\Delta t_{mín.} = 10\ \text{s}}$$

Resposta: 10 s

R. 97 Tem-se um gerador de potência máxima igual a 100 W e corrente de curto-circuito 10 A. Calcule sua fem E e sua resistência interna r.

Solução:

Para esse gerador, temos $Pot_{\ell(máx.)} = 100$ W e $i_{cc} = 10$ A. Como $i_{cc} = \dfrac{E}{r}$ e $Pot_{\ell(máx.)} = \dfrac{E^2}{4r}$, tem se:

$$\frac{Pot_{\ell(máx.)}}{i_{cc}} = \frac{\frac{E^2}{4r}}{\frac{E}{r}} \Rightarrow \frac{Pot_{\ell(máx.)}}{i_{cc}} = \frac{E}{4} \Rightarrow \frac{100}{10} = \frac{E}{4} \Rightarrow \boxed{E = 40\ \text{V}}$$

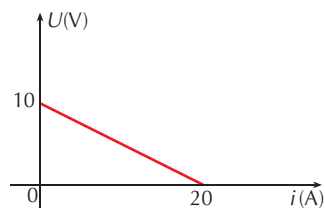
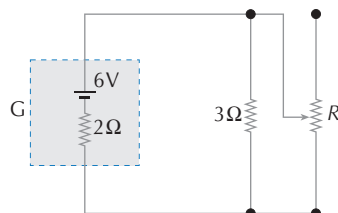
De $i_{cc} = \dfrac{E}{r}$, vem: $r = \dfrac{E}{i_{cc}} = \dfrac{40}{10} \Rightarrow \boxed{r = 4\ \Omega}$

Resposta: 40 V e 4 Ω

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

P. 225 No gráfico a seguir, representa-se a curva característica de um gerador. Determine:

a) a fem e a resistência interna desse gerador;

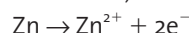
b) a potência máxima que ele pode lançar em um circuito.

P. 226 No circuito esquematizado, o reostato tem sua resistência elétrica R variando de 0 a 12 Ω. Qual o valor de R para que o gerador G forneça a máxima potência? Qual a intensidade da corrente elétrica no gerador nessa situação?

As pilhas secas

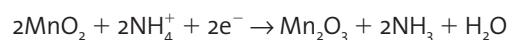
As pilhas de zinco-carvão, denominadas pilhas de Leclanché, as pilhas alcalinas, as pilhas de mercúrio e as pilhas de níquel-cádmio constituem os principais tipos de pilhas secas. Todas elas possuem dois componentes metálicos, o **cátodo**, que é o polo positivo da pilha, o **ânodo**, que constitui o polo negativo, e uma substância úmida, o **eletrólito**.

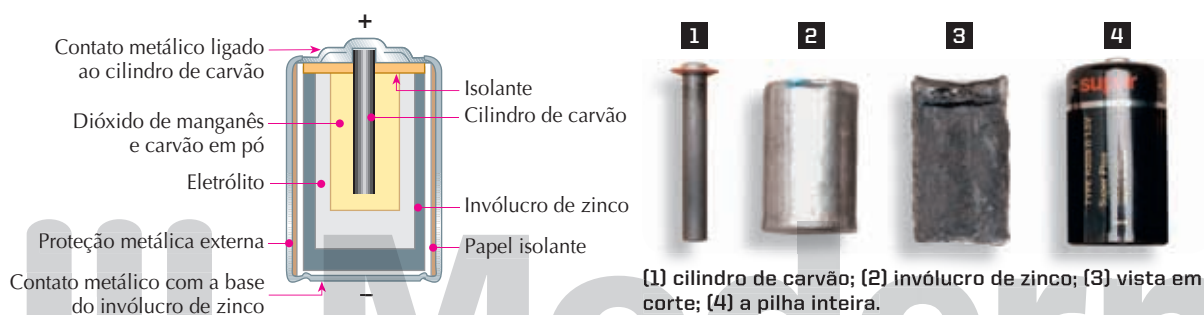
- **Pilhas de zinco-carvão ou pilhas de Leclanché**

Este tipo de pilha, inventada pelo químico francês George Leclanché, em 1865, apresenta um invólucro de zinco que constitui o ânodo e um pequeno cilindro de carvão, o cátodo. Em torno do cilindro de carvão existe uma mistura de dióxido de manganês (MnO_2) e carvão em pó, que constitui na realidade o cátodo. O eletrólito é uma mistura formada de cloreto de amônio ($NH_4C\ell$), cloreto de zinco ($ZnC\ell_2$) e água. Essa mistura é pastosa; daí o nome de pilha seca, em oposição àquelas que contêm um eletrólito líquido, como é o caso do ácido sulfúrico existente nas baterias de chumbo.

Ao ligarmos a pilha a elementos de um circuito elétrico, tem-se no ânodo a reação química:

$$Zn \rightarrow Zn^{2+} + 2e^-$$

Os elétrons liberados no ânodo atravessam o circuito elétrico externo à pilha e atingem o cátodo, onde ocorre a reação química:

$$2MnO_2 + 2NH_4^+ + 2e^- \rightarrow Mn_2O_3 + 2NH_3 + H_2O$$

A pilha estará totalmente descarregada quando todo o dióxido de manganês for consumido. As pilhas de Leclanché são utilizadas em lanternas, *flashes* eletrônicos de máquinas fotográficas, rádios portáteis, relógios etc.

(1) cilindro de carvão; (2) invólucro de zinco; (3) vista em corte; (4) a pilha inteira.

- **Pilhas alcalinas**

As pilhas alcalinas possuem o mesmo tipo de ânodo e cátodo das pilhas anteriormente descritas, diferindo apenas no eletrólito, que é uma substância alcalina — o hidróxido de potássio (KOH) — em vez do cloreto de amônio ($NH_4C\ell$), que tem caráter ácido. Em relação às pilhas de Leclanché, as alcalinas possuem maior durabilidade, apresentam maior capacidade de armazenar energia, possuem menor resistência interna e mantêm entre seus terminais uma tensão constante por mais tempo.

- **Pilhas de mercúrio**

As pilhas de mercúrio possuem como ânodo o zinco e como cátodo o óxido de mercúrio (HgO). O eletrólito é constituído de hidróxido de potássio (KOH) e hidróxido de zinco ($Zn(OH)_2$). Essas pilhas apresentam grande durabilidade, boa capacidade de armazenar energia e formato reduzido. São usadas em relógios de pulso, aparelhos de surdez, calculadoras portáteis etc. São conhecidas como bateria do tipo "botão". Devido aos efeitos nocivos ao ambiente e ao ser humano, não devem ser descartadas no lixo comum.

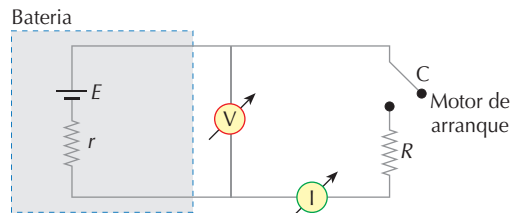
- **Pilhas de níquel-cádmio (NiCd)**

Nessas pilhas, o cádmio metálico constitui o ânodo e o óxido de níquel (NiO_2), o cátodo. O eletrólito é uma solução concentrada de hidróxido de potássio (KOH). As reações químicas que ocorrem são reversíveis, isto é, essas pilhas podem ser recarregadas. São utilizadas em vários aparelhos elétricos e eletrônicos, como telefones sem fio, câmeras digitais, telefones celulares etc. As pilhas de níquel-cádmio (NiCd) estão sendo cada vez menos usadas, principalmente porque o cádmio é um metal pesado que pode provocar problemas para o meio ambiente e o ser humano. Seu descarte não pode ser feito no lixo comum, devendo ser encaminhadas aos fabricantes ou importadores.

- **Pilhas de níquel-metal-hidreto (NiMH)**

As pilhas de níquel-metal-hidreto utilizam hidrogênio absorvido em uma liga, na forma de hidreto metálico (MH), como ânodo, em vez do cádmio, utilizado nas pilhas de níquel-cádmio. Atualmente, as pilhas recarregáveis mais utilizadas nos aparelhos eletroeletrônicos são as de NiMH, que além de terem maior capacidade de carga e maior tempo de vida, suportam mais recargas em comparação às de NiCd. Além disso, são menos poluentes, já que não utilizam materiais pesados, como o cádmio.

EXERCÍCIOS PROPOSTOS DE RECAPITULAÇÃO

P. 227 (Unicamp-SP) Uma bateria de automóvel pode ser representada por uma fonte de tensão ideal E em série com uma resistência r. O motor de arranque, com resistência R, é acionado pela chave de contato C, conforme mostra a figura abaixo.

Foram feitas as seguintes medidas no voltímetro e no amperímetro ideais:

	Chave aberta	Chave fechada
V (volts)	12	10
I (ampères)	0	100

a) Calcule o valor da diferença de potencial E.

b) Calcule r e R.

Considere que no instante em que a chave é fechada, o motor de arranque funciona como um resistor de resistência R.

P. 228 (Vunesp) Suponha que você dispõe de uma pilha comum de 1,5 V e uma pequena lâmpada de lanterna cujas especificações são 1,5 V — 2,0 A.

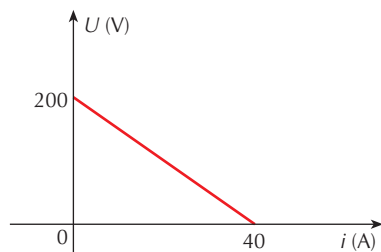
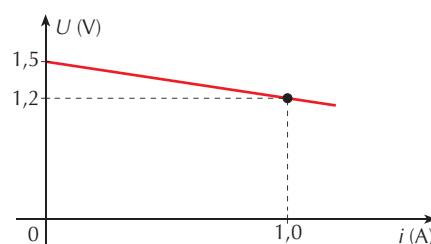
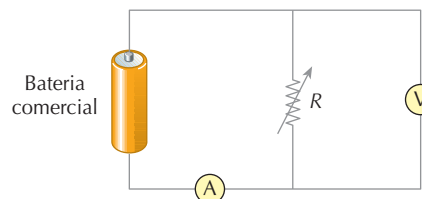
a) Qual a potência que essa lâmpada deve dissipar, se for ligada diretamente aos terminais da pilha?

b) Pela lei de Ohm, se ligarmos diretamente os terminais da pilha com um pequeno fio de resistência praticamente nula, a corrente que vai passar por esse fio será praticamente infinita. Isso, na prática, realmente ocorre? Justifique.

P. 229 (UFU-MG) A curva de corrente contínua, característica fornecida pelo fabricante de um gerador, está representada na figura. Conectando-se uma lâmpada de resistência $R = 45\ \Omega$ a esse gerador, responda:

a) Qual o valor da corrente elétrica no circuito?

b) Qual o rendimento do gerador nessa condição?

c) Qual a potência dissipada pela lâmpada?

P. 230 (UFRJ) Uma bateria comercial de 1,5 V é utilizada no circuito esquematizado abaixo, no qual o amperímetro e o voltímetro são considerados ideais. Varia-se a resistência R, e as correspondentes indicações do amperímetro e do voltímetro são usadas para construir o seguinte gráfico de voltagem (U) *versus* intensidade de corrente (i).

Usando as informações do gráfico, calcule:

a) o valor da resistência interna da bateria;

b) a indicação do amperímetro quando a resistência R tem o valor 1,7 Ω.

P. 231 (Fuvest-SP) A bateria de um carro, de fem 12 V, é usada para acionar um rádio de 12 V que necessita de 2 A para seu funcionamento e para manter acesas duas lâmpadas de farol de 12 V e 48 W cada uma.

a) Qual a intensidade de corrente elétrica fornecida pela bateria para alimentar o rádio e as duas lâmpadas?

b) Qual a carga, em coulombs, perdida pela bateria em uma hora?

P. 232 (Fuvest-SP) A uma bateria de 12 volts ligam-se dois resistores pelos quais passam respectivamente 0,5 A e 1,5 A.

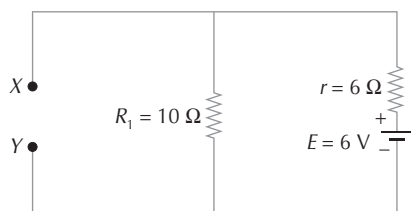
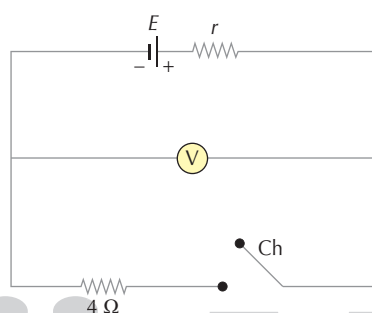
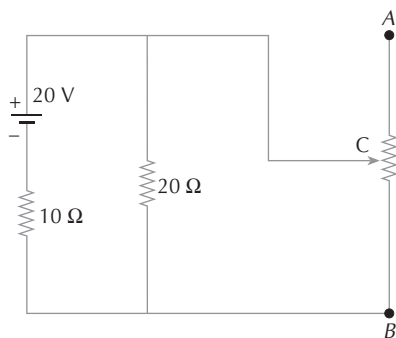
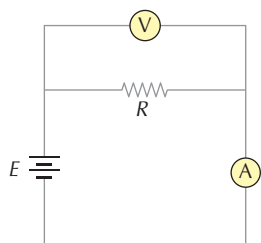
a) Qual a carga fornecida pela bateria durante 5 minutos?

b) Qual a potência total dissipada nos resistores?

P. 233 (Fuvest-SP) Um circuito elétrico contém 3 resistores (R_1, R_2 e R_3) e uma bateria de 12 V, cuja resistência interna é desprezível. As correntes que percorrem os resistores R_1, R_2 e R_3 são, respectivamente, 20 mA, 80 mA e 100 mA. Sabendo-se que o resistor R_2 tem resistência igual a 25 ohms:

a) esquematize o circuito elétrico;

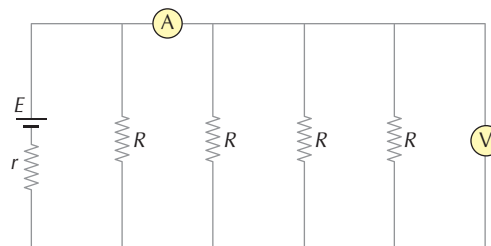
b) calcule os valores das outras duas resistências.

P. 234 (ITA-SP) Calcule o valor da resistência elétrica do resistor que deve ser colocado entre X e Y no circuito da figura para que a corrente através de R_1 seja igual a 0,3 A.

P. 235 No circuito da figura, quando a chave Ch está fechada, a indicação do voltímetro V ideal é $\frac{1}{3}$ de sua indicação quando Ch está aberta.
Determine a resistência interna do gerador.

P. 236 (FEI-SP) No circuito da figura, o reostato *AB* está munido do cursor *C*, sendo a resistência entre *A* e *B* igual a 40 Ω. Qual a corrente no gerador quando o cursor está em *B*? Em que posição deverá ser colocado o cursor para que a corrente no gerador seja a metade daquela encontrada na situação anterior?

P. 237 (Vunesp) No circuito da figura, a fonte é uma bateria de fem E = 12 V, o resistor tem resistência R = 1.000 Ω, V representa um voltímetro e A um amperímetro.

Determine a leitura desses medidores:

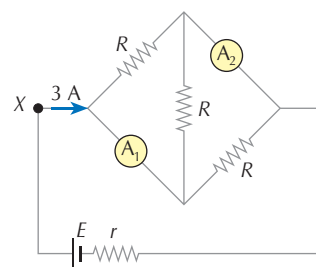
a) em condições ideais, ou seja, supondo que os fios e o amperímetro não tenham resistência elétrica e a resistência elétrica do voltímetro seja infinita;

b) em condições reais, em que as resistências elétricas da bateria, do amperímetro e do voltímetro são r = 1,0 Ω, R_A = 50 Ω e R_V = 10.000 Ω, respectivamente, desprezando apenas a resistência dos fios de ligação.

(Nos seus cálculos, não é necessário utilizar mais de três algarismos significativos.)

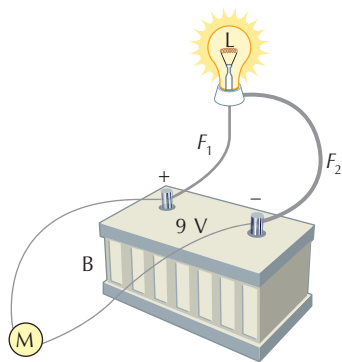
P. 238 (Fuvest-SP) No circuito da figura, E = 8 V, r = 100 Ω e R = 1.200 Ω.

a) Qual a leitura do amperímetro A?

b) Qual a leitura do voltímetro V? Considere o amperímetro e o voltímetro ideais.

P. 239 (UFSCar-SP) O circuito mostra três resistores de mesma resistência R = 9 Ω, ligados a um gerador de fem E e resistência interna r = 1 Ω, além de dois amperímetros ideais, A_1 e A_2. A corrente elétrica que passa pelo ponto X é de 3 ampères e a ddp nos terminais do gerador é de 9 volts. Os fios de ligação apresentam resistência elétrica desprezível.

Calcule:

a) o valor da fem E do gerador e a potência total dissipada pelo circuito, incluindo a potência dissipada pela resistência interna do gerador;

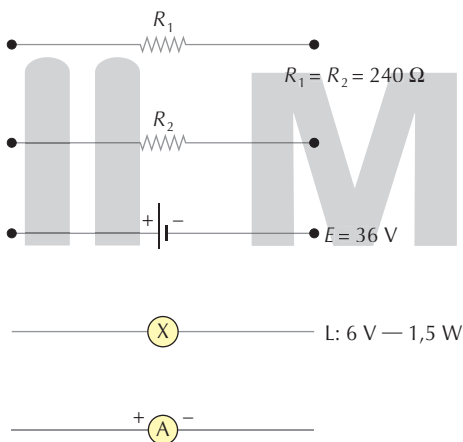
b) os valores das correntes elétricas que atravessam os amperímetros A_1 e A_2.

P. 240 (Fuvest-SP) Uma lâmpada L está ligada a uma bateria B por 2 fios, F_1 e F_2, de mesmo material, de comprimentos iguais e de diâmetros *d* e 3*d*, respectivamente. Ligado aos terminais da bateria, há um voltímetro ideal M (com resistência interna muito grande), como mostra a figura. Nessas condições a lâmpada está acesa, tem resistência R_L = 2,0 Ω e dissipa uma potência igual a 8,0 W. A força eletromotriz da bateria é E = 9,0 V e a resistência do fio F_1 é R_1 = 1,8 Ω.

Determine o valor da:

a) corrente i, em ampères, que percorre o fio F_1;

b) potência Pot_2, em watts, dissipada no fio F_2;

c) diferença de potencial V_M, em volts, indicada pelo voltímetro M.

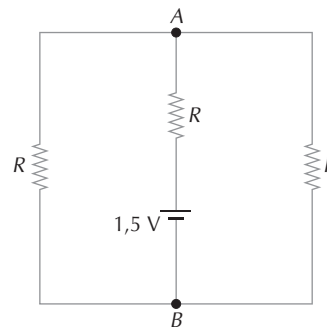
P. 241 (Fuvest-SP) Dispõe-se dos seguintes elementos: dois resistores idênticos, uma fonte de tensão e um amperímetro ideais, uma lâmpada e fios de ligação. Pretende-se montar um circuito em que a lâmpada funcione de acordo com as suas especificações e o amperímetro acuse a corrente que passa por ela.

a) Qual a corrente que o amperímetro indicará?

b) Desenhe o circuito incluindo os elementos necessários.

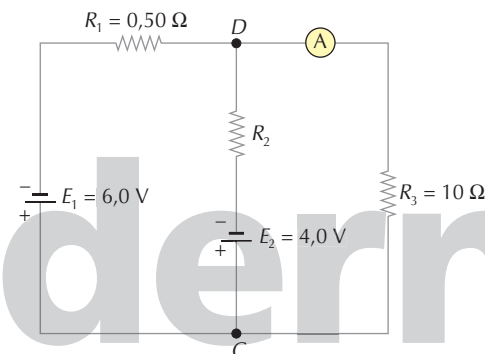
P. 242 (Olimpíada Brasileira de Física) Dispõe-se dos seguintes elementos e respectivas características: uma bateria de 12 V, fios de ligação, um fusível e três resistores com suas características: R_1 (8 W, 10 V), R_2 (2 W, 2 V) e R_3 (2 W, 10 V).

a) Faça um esquema das ligações contendo os elementos citados de tal forma que eles funcionem dentro das respectivas especificações.

b) Esboce o mesmo circuito, inserindo um amperímetro para medir a corrente que passa pelo resistor que possui maior resistência elétrica. Qual é o valor da corrente que ele deverá indicar?

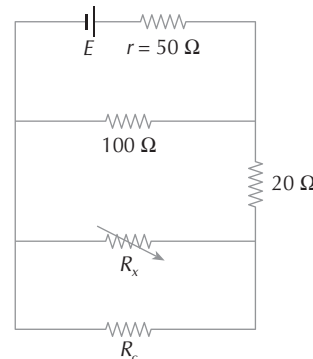
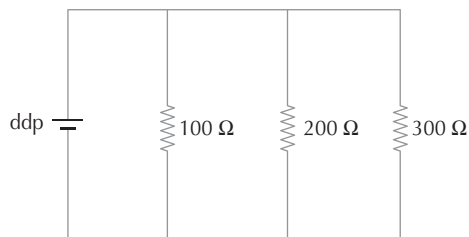
P. 243 (Vunesp) Três resistores idênticos, cada um com resistência R, e uma pilha de 1,5 V e resistência interna desprezível são ligados como mostra a figura.

a) Determine a diferença de potencial entre A e B.

b) Supondo $R = 100\ \Omega$, determine a intensidade da corrente elétrica que passa pela pilha.

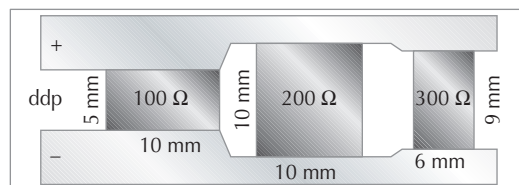
P. 244 (Fuvest-SP) Considere o circuito representado esquematicamente na figura. O amperímetro ideal A indica a passagem de uma corrente de 0,50 A. Os valores das resistências dos resistores R_1 e R_3 e das forças eletromotrizes E_1 e E_2 dos geradores ideais estão indicados na figura. O valor do resistor R_2 não é conhecido.

Determine:

a) o valor da diferença de potencial entre os pontos C e D;

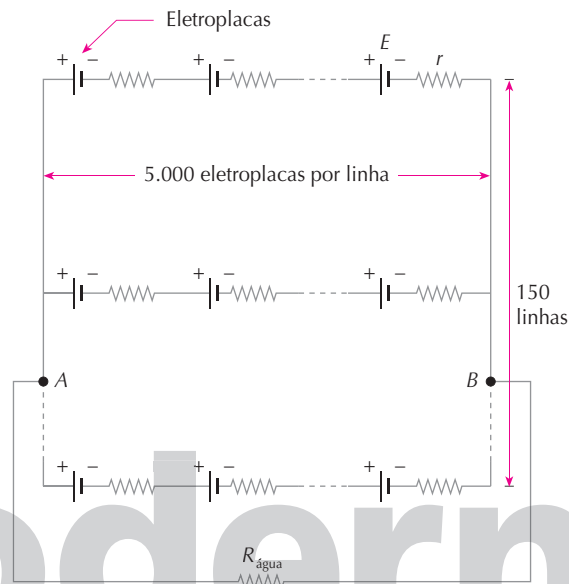
b) a potência fornecida pelo gerador E_1.

P. 245 (ITA-SP) Sabe-se que a máxima transferência de energia de uma bateria ocorre quando a resistência do circuito se iguala à resistência interna da bateria, isto é, quando há o casamento de resistências. No circuito da figura, a resistência de carga R_c varia na faixa $100\ \Omega \leq R_c \leq 400\ \Omega$. O circuito possui um resistor variável, R_x, que é usado para ajuste da máxima transferência de energia. Determine a faixa de valores de R_x para que seja atingido o casamento de resistências do circuito.

P. 246 (Unicamp-SP) Algumas pilhas são vendidas com um testador de carga. O testador é formado por 3 resistores em paralelo, como mostrado esquematicamente na figura abaixo. Com a passagem de corrente, os resistores dissipam potência e se aquecem. Sobre cada resistor é aplicado um material que muda de cor ("acende") sempre que a potência nele dissipada passa de um certo valor, que é o mesmo para os três indicadores. Uma pilha nova é capaz de fornecer uma diferença de potencial (ddp) de 9,0 V, o que faz os 3 indicadores "acenderem". Com uma ddp menor que 9,0 V, o indicador de 300 Ω já não "acende". A ddp da pilha vai diminuindo à medida que a pilha vai sendo usada.

a) Qual a potência total dissipada em um teste com uma pilha nova?

b) Quando o indicador do resistor de 200 Ω deixa de "acender", a pilha é considerada descarregada. A partir de qual ddp a pilha é considerada descarregada?

P. 247 (Unicamp-SP) Na prática, o circuito testador da questão anterior é construído sobre uma folha de plástico, como mostra o diagrama abaixo. Os condutores (cinza-claro) consistem em uma camada metálica de resistência desprezível, e os resistores (cinza-escuro) são feitos de uma camada fina (10 μm de espessura, ou seja, $10 \cdot 10^{-6}$ m) de um polímero condutor. A resistência R de um resistor está relacionada com a resistividade ρ por $R = \rho \cdot \frac{L}{A}$ por onde L é o comprimento e A é a área da seção reta perpendicular à passagem de corrente.

a) Determine o valor da resistividade ρ do polímero a partir da figura. As dimensões (em mm) estão indicadas no diagrama.

b) O que aconteceria com o valor das resistências se a espessura da camada de polímero fosse reduzida à metade? Justifique sua resposta.

P. 248 (UnB-DF) Um perigo para os mergulhadores em rios e oceanos é o contato com peixes elétricos. Sabe-se que essa espécie produz eletricidade a partir de células biológicas (eletroplacas) que funcionam como baterias elétricas. Certos peixes elétricos encontrados na América do Sul contêm um conjunto de eletroplacas organizadas de forma análoga ao circuito elétrico representado na figura a seguir. Existem, ao longo do corpo deles, 150 linhas horizontais, com 5.000 eletroplacas por linha. Cada eletroplaca tem uma força eletromotriz (E) de 0,15 V e uma resistência elétrica (r) interna de 0,30 Ω. A resistência da água — $R_{água}$ — em torno do peixe deve ser considerada igual a 740 Ω.

Com base nessas informações, calcule uma das seguintes quantidades, desprezando a parte fracionária do resultado final obtido após efetuar todos os cálculos solicitados.

a) O número total de eletroplacas do peixe elétrico, expressando a quantidade calculada em milhares de eletroplacas.

b) A resistência equivalente em cada linha de eletroplacas, em ohms.

c) A resistência equivalente do peixe elétrico, observada entre os pontos A e B, em ohms.

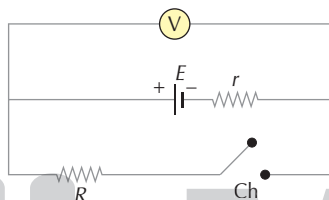
d) A potência dissipada no peixe elétrico, em watts, quando este está submerso na água.

P. 249 (UFBA) Nos terminais de um gerador que alimenta um circuito, a ddp passa de 8,0 V para 5,0 V, quando a intensidade da corrente que atravessa o gerador passa de 2,0 A para 5,0 A. Determine, em ampères, a intensidade da corrente que passa pelo gerador, no momento em que a potência transferida para o circuito for máxima.

TESTES PROPOSTOS

T. 195 (FCC-SP) A força eletromotriz de uma bateria é:

a) a força elétrica que acelera os elétrons.
b) igual à tensão elétrica entre os polos da bateria quando a eles está ligado um resistor de resistência elétrica igual à resistência interna da bateria.
c) a força dos motores elétricos ligados à bateria.
d) igual à tensão elétrica entre os bornes da bateria enquanto eles estão em aberto.
e) igual ao produto da resistência interna pela corrente elétrica.

T. 196 (UEL-PR) O circuito esquematizado a seguir é constituído por um gerador de fem E e resistência interna r, um resistor de resistência $R = 10\ \Omega$, um voltímetro ideal V e uma chave interruptora Ch. Com a chave aberta, o voltímetro indica 6,0 V. Fechando a chave, o voltímetro indica 5,0 V.

Nessas condições, a resistência interna r do gerador, em ohms, vale:

a) 2,0 b) 4,0 c) 5,0 d) 6,0 e) 10

T. 197 (Univali-SC) Durante a partida de um motor de automóvel, o motor de arranque demanda uma corrente elétrica da ordem de 200 A e a tensão nos terminais da bateria cai do valor normal de 12 V para 8 V.

É por essa razão que as luzes ficam fracas e o rádio, se estiver ligado, deixa de funcionar. Os carros modernos têm um dispositivo que desliga automaticamente, durante a partida, todos os circuitos não necessários.

O valor da resistência interna dessa bateria é, em ohms:

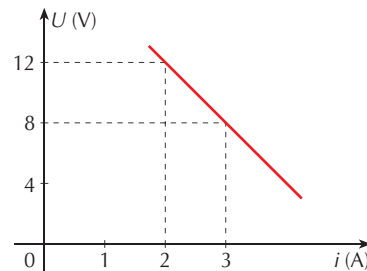
a) 0,4 b) 0,2 c) 0,06 d) 0,04 e) 0,02

T. 198 (UFSCar-SP) Com respeito aos geradores de corrente contínua e suas curvas características $U \times i$, analise as afirmações seguintes:

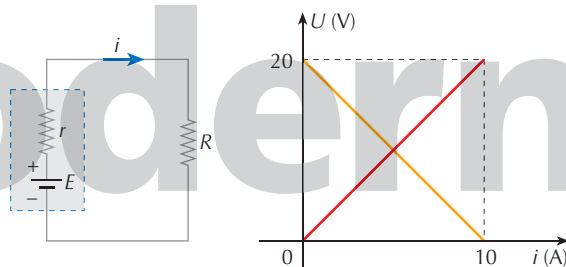
I. Matematicamente, a curva característica de um gerador é decrescente e limitada à região contida no primeiro quadrante do gráfico.
II. Quando o gerador é uma pilha em que a resistência interna varia com o uso, a partir do momento em que o produto dessa resistência pela corrente elétrica se iguala à força eletromotriz, a pilha deixa de alimentar o circuito.
III. Em um gerador real conectado a um circuito elétrico, a diferença de potencial entre seus terminais é menor que a força eletromotriz.

Está correto o contido em:

a) I, apenas b) II, apenas c) I e II, apenas d) II e III, apenas e) I, II e III

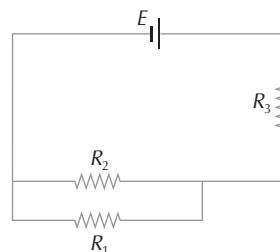
T. 199 (Mackenzie-SP) Um reostato é ligado aos terminais de uma bateria. O gráfico foi obtido variando a resistência do reostato e mostra a variação da ddp U entre os terminais da bateria em função da intensidade de corrente i que a atravessa.

A força eletromotriz (fem) dessa bateria vale:

a) 20 V b) 16 V c) 12 V d) 8 V e) 4 V

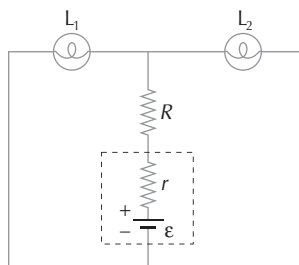
T. 200 O esquema representa um circuito elétrico. O diagrama representa as curvas características dos elementos componentes (tensão em função da corrente). A corrente no circuito tem intensidade i.

Assinale o conjunto coerente:

	E (V)	r (Ω)	R (Ω)	i(A)
a)	20	2	2	10
b)	10	2	2	2,5
c)	20	0	2	10
d)	10	0	2	5

e) nenhum dos anteriores

T. 201 (Mackenzie-SP) No circuito, a resistência R_1 vale $50\ \Omega$ e a potência nela dissipada é de 18 W. A ddp nos extremos da resistência R_3 é de 42 V.

Sabendo-se que o rendimento do gerador é de 90%, podemos afirmar que sua força eletromotriz é de:

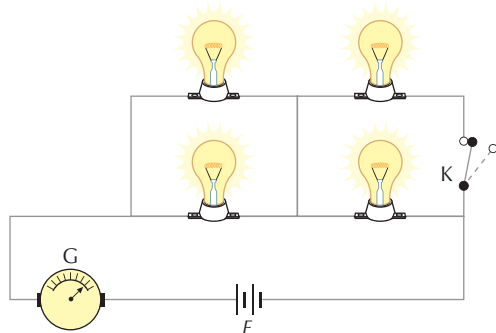
a) 20 V b) 33 V c) 46 V d) 66 V e) 80 V

T. 202 (Mackenzie-SP) Num determinado trabalho em laboratório, necessita-se disponibilizar um circuito elétrico conforme a ilustração abaixo. Nesse circuito existem duas lâmpadas incandescentes idênticas (L_1 e L_2), cada uma com a inscrição nominal 0,20 W — 2,0 V, um resistor de resistência elétrica $R = 12\ \Omega$ e um gerador elétrico de força eletromotriz 4,5 V e resistência interna r.

Para que as lâmpadas permaneçam "acesas" com brilho máximo, mas sem se "queimar", a resistência interna do gerador elétrico deverá ser:

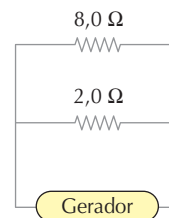
a) 0,050 Ω
b) 0,25 Ω
c) 0,50 Ω
d) 0,75 Ω
e) 1,0 Ω

T. 203 (Unifor-CE) Um gerador de fem $E = 100$ V e resistência interna $r = 2{,}0\ \Omega$ alimenta um resistor ôhmico de resistência elétrica R. Sabendo-se que o rendimento do gerador, na situação descrita, é de 80%, o valor de R, em ohms, é:

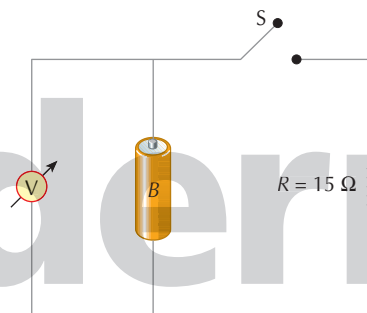
a) 2,0
b) 4,0
c) 8,0
d) 20
e) 40

T. 204 (Uece) Uma bateria, de força eletromotriz E e resistência interna desprezível, alimenta quatro lâmpadas idênticas, ligadas conforme se mostra no esquema a seguir.

Quando a chave K está ligada, o amperímetro G indica uma corrente de intensidade i. Desligando-se a chave K, a nova corrente fornecida pelo gerador será:

a) $\frac{i}{2}$ b) $\frac{2i}{3}$ c) $\frac{4i}{3}$ d) $\frac{3i}{2}$

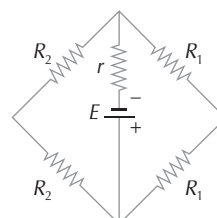
T. 205 (Unirio-RJ) Medir a diferença de potencial nos terminais de um gerador que não se encontra em funcionamento é determinar a força eletromotriz do gerador. Para o gerador indicado na figura, o valor encontrado foi 20 V. Curioso por saber se o gerador possuía ou não resistência interna, um aluno monta o circuito abaixo e percebe que a intensidade de corrente no resistor de 8,0 Ω é 2,0 A.

Cálculos complementares permitiram que o aluno concluísse que a resistência interna do gerador:

a) vale 0,40 Ω.
b) vale zero, pois se trata de um gerador ideal.
c) vale 1,0 Ω.
d) dissipa uma potência de 3,0 W.
e) vale 0,50 Ω.

T. 206 (Olimpíada Brasileira de Física) Um circuito elétrico foi montado conforme a figura, fazendo uso de uma pilha, B, de 1,5 V, uma resistência de 15 ohms, uma chave S e um voltímetro V. Todos os aparelhos são reais.

É correto afirmar, em relação a esse circuito, que:

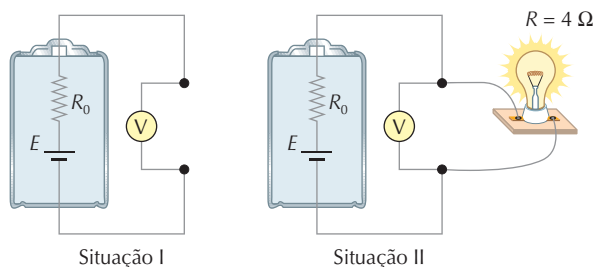
a) ao fechar a chave S, o voltímetro indicará 1,5 V.
b) tanto com a chave S aberta quanto fechada, a leitura do voltímetro permanecerá a mesma.
c) considerando a corrente convencional, ao fechar a chave S, o número de cargas que passam pela chave é maior do que aquele que chega na parte inferior da pilha.
d) ao fechar a chave S, o voltímetro indicará um valor menor do que indicava com a chave aberta.
e) com a chave aberta não circula corrente no circuito.

T. 207 Para o circuito da figura, onde: $E = 12$ V, $r = 2{,}0\ \Omega$, $R_1 = 20\ \Omega$ e $R_2 = 5{,}0\ \Omega$, pode-se afirmar que a corrente elétrica que passa pelo gerador tem intensidade:

a) 1,2 A
b) 2,4 A
c) 3,6 A
d) 4,8 A
e) zero

T. 208 (PUC-SP) Dispõe-se de uma pilha de força eletromotriz 1,5 V que alimenta duas pequenas lâmpadas idênticas, de valores nominais 1,2 V — 0,36 W. Para que as lâmpadas funcionem de acordo com suas especificações, a resistência interna da pilha deve ter, em ohm, um valor de, no mínimo:

a) 0,1
b) 0,2
c) 0,3
d) 0,4
e) 0,5

T. 209 (Fuvest-SP) Uma bateria possui força eletromotriz E e resistência interna R_0. Para determinar essa resistência, um voltímetro foi ligado aos dois polos da bateria, obtendo-se $V_0 = E$ (situação I).

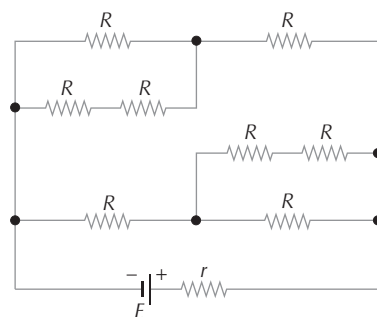
Situação I

Situação II

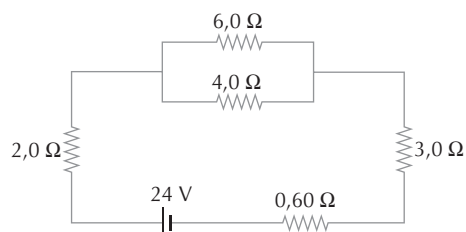
Em seguida, os terminais da bateria foram conectados a uma lâmpada. Nessas condições, a lâmpada tem resistência $R = 4\ \Omega$ e o voltímetro indica V_A (situação II), de tal forma que $\frac{V_0}{V_A} = 1,2$.

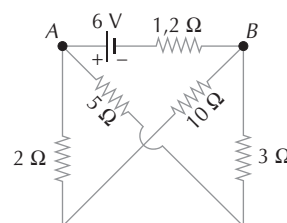
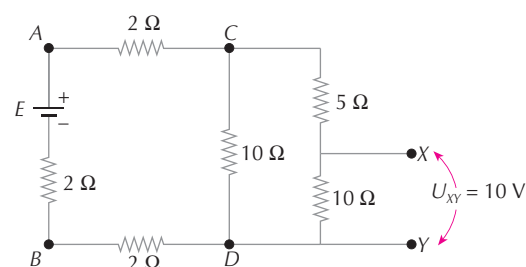
Dessa experiência, conclui-se que o valor de R_0 é:

a) 0,8 Ω
b) 0,6 Ω
c) 0,4 Ω
d) 0,2 Ω
e) 0,1 Ω

T. 210 (UFMA) No circuito, $E = 6$ volts e $r = 0,5$ ohm. Sendo de 12 watts a potência total dissipada no circuito, o valor de cada resistência R, em ohms, é:

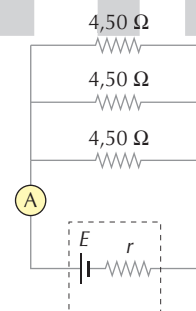
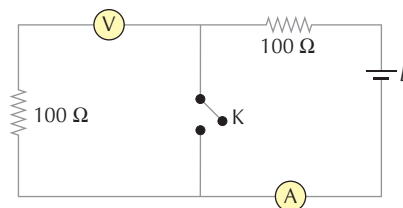
a) 16
b) 6
c) 8
d) 12
e) 3

T. 211 (PUC-MG) A intensidade da corrente, em ampères, na resistência de 6,0 Ω é:

a) 1,2
b) 2,0
c) 3,6
d) 4,0
e) 8,0

T. 212 (Mackenzie-SP) No circuito representado, a ddp entre os pontos A e B é:

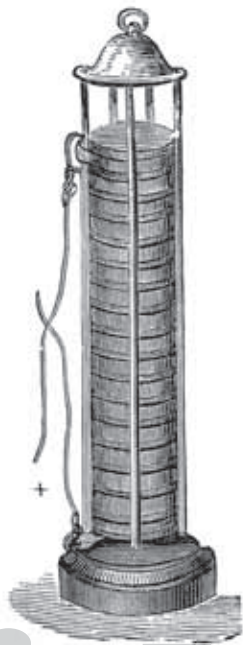
a) 2,4 V
b) 4,8 V
c) 1,2 V
d) 6,0 V
e) zero

T. 213 (Esal-MG) O gerador do circuito da figura tem força eletromotriz E e resistência interna 2 Ω.

Para se obter uma diferença de potencial de 10 V entre os pontos X e Y, a força eletromotriz E vale:

a) 30 V
b) 25 V
c) 20 V
d) 15 V
e) 10 V

T. 214 (Mackenzie-SP) No circuito elétrico ilustrado ao lado, o amperímetro A é considerado ideal e o gerador, de força eletromotriz E, possui resistência interna $r = 0,500\ \Omega$. Sabendo que a intensidade de corrente elétrica medida pelo amperímetro é 3,00 A, a energia elétrica lançada pelo gerador no intervalo de 1,00 minuto é:

a) 480 J
b) 810 J
c) 1,08 kJ
d) 1,62 kJ
e) 4,80 kJ

T. 215 (Fuvest-SP) No circuito da figura, o amperímetro e o voltímetro são ideais. O voltímetro marca 1,5 V quando a chave K está aberta.

Fechando-se a chave K o amperímetro marcará:

a) 0 mA
b) 7,5 mA
c) 15 mA
d) 100 mA
e) 200 mA

T. 216 (UFF-RJ) Alessandro Volta foi o primeiro cientista a produzir um fluxo contínuo de corrente elétrica, por volta do ano 1800. Isso foi conseguido graças ao artefato que inventou, ao "empilhar" vários discos de cobre e zinco, separados por discos de papelão embebidos em água salgada. O artefato recebeu o nome de pilha voltaica.

A força eletromotriz E e a resistência interna r de uma pilha podem ser determinadas, medindo-se, simultaneamente, a diferença de potencial entre seus terminais e a corrente através da pilha em duas situações distintas. Para fazer essas medidas, dispõe-se de dois resistores diferentes, R_1 e R_2, um voltímetro V, um amperímetro A e uma chave S que pode fechar o circuito de duas maneiras distintas.

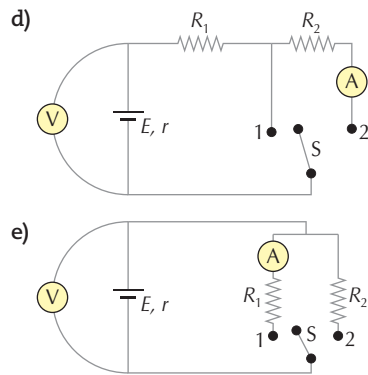
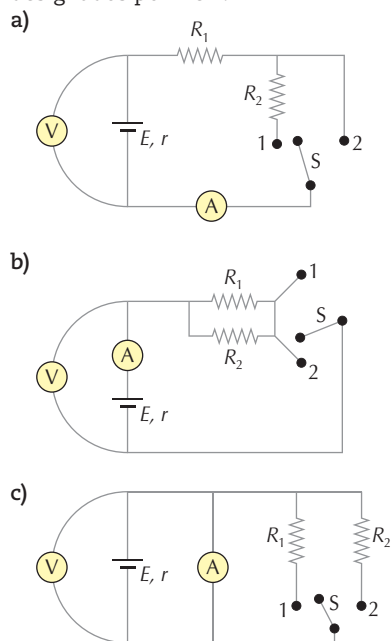
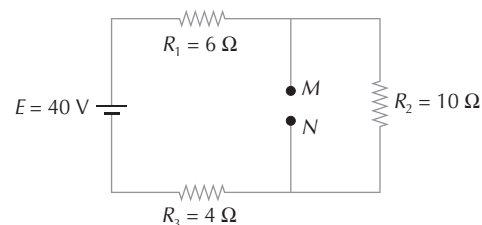
Assinale a opção que representa o circuito que permite realizar os dois conjuntos de medidas, alternando-se a posição da chave S entre os pontos designados por 1 e 2.

a)

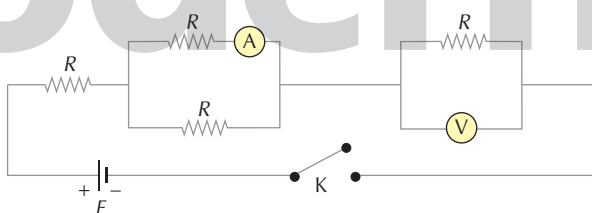
b)

c)

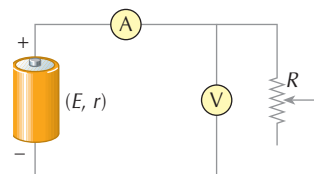
d)

e)

T. 217 (PUC-Campinas-SP) Considere o circuito simples representado com os valores indicados.

Ligando entre os pontos M e N um amperímetro ideal e, a seguir, substituindo-o por um voltímetro ideal, suas indicações serão, respectivamente:

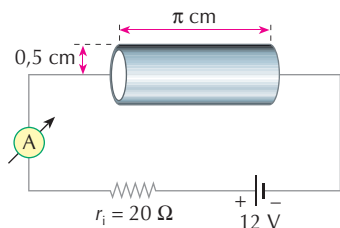
a) 8 A e 80 V
b) 4 A e 40 V
c) 4 A e 20 V
d) 2 A e 40 V
e) 2 A e 20 V

T. 218 (Fuvest-SP) O amperímetro A e o voltímetro V do circuito da figura são ideais. Com a chave K ligada, o amperímetro marca 1 mA e o voltímetro 3 V.

Desprezando-se a resistência interna da bateria, quais os valores de R e E?

a) $R = 1.500\ \Omega$ e $E = 7{,}5$ V
b) $R = 3.000\ \Omega$ e $E = 15$ V
c) $R = 500\ \Omega$ e $E = 3$ V
d) $R = 1{,}5\ \Omega$ e $E = 5$ V
e) $R = 3{,}0\ \Omega$ e $E = 15$ V

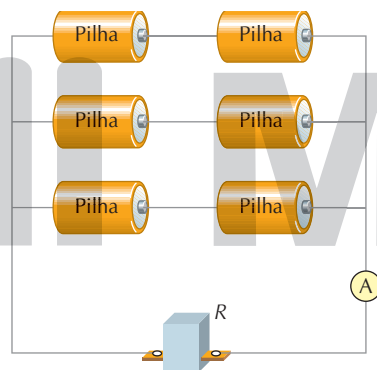
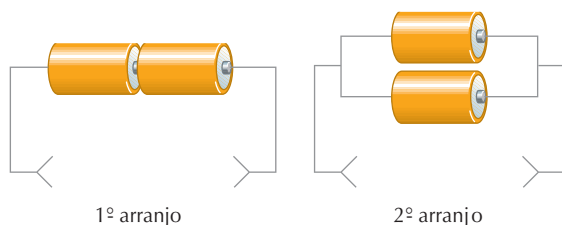
T. 219 (ITA-SP) Uma bateria de fem E e resistência interna r foi ligada a um reostato R, conforme a figura, onde A é um amperímetro ideal e V um voltímetro também ideal.

Aumentando-se R, tem-se que as indicações de:

a) V e A aumentam.
b) V aumenta e A diminui.
c) V diminui e A aumenta.
d) V e A diminuem.
e) V diminui e A permanece constante.

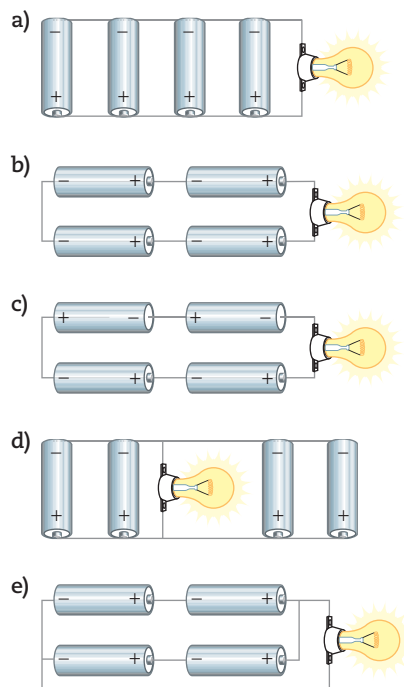
T. 220 (PUC-SP) Um bateria de fem 12 V, com resistência interna r_i = 20 Ω, alimenta o condutor cilíndrico mostrado na figura.

Sabendo-se que a leitura no miliamperímetro, de resistência interna desprezível, é de 100 mA, podemos afirmar que a resistividade do condutor cilíndrico é de:

a) 0,25 Ω · cm
b) 1,00 Ω · cm
c) 25 Ω · cm
d) 100 Ω · cm
e) 250 Ω · cm

T. 221 (Fuvest-SP) Seis pilhas iguais, cada uma com diferença de potencial V, estão ligadas a um aparelho, com resistência elétrica R, na forma esquematizada na figura. Nessas condições, a corrente medida pelo amperímetro A, colocado na posição indicada, é igual a:

a) $\frac{V}{R}$ b) $\frac{2V}{R}$ c) $\frac{2V}{3R}$ d) $\frac{3V}{R}$ e) $\frac{6V}{R}$

T. 222 (Fuvest-SP) As figuras ilustram pilhas ideais associadas em série (1º arranjo) e em paralelo (2º arranjo).

Supondo as pilhas idênticas, identifique a alternativa correta.

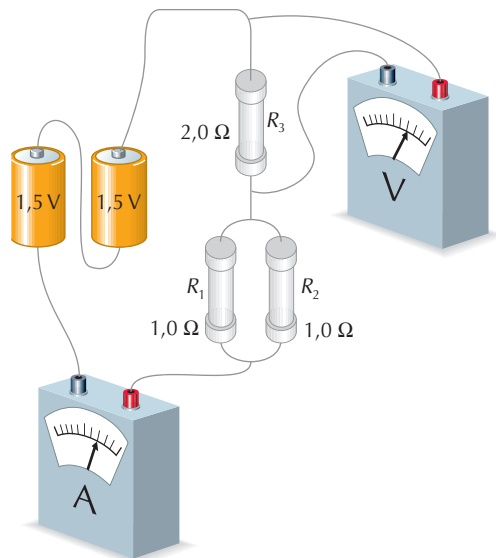
a) Ambos os arranjos fornecem a mesma tensão.
b) O primeiro arranjo fornece uma tensão maior que o segundo.
c) Se ligarmos um voltímetro nos terminais do segundo arranjo, ele indicará uma diferença de potencial nula.
d) Ambos os arranjos, quando ligados a um mesmo resistor, fornecem a mesma corrente.
e) Se ligarmos um voltímetro nos terminais do primeiro arranjo, ele indicará uma diferença de potencial nula.

T. 223 (Fuvest-SP) Com 4 pilhas ideais de 1,5 V, uma lâmpada de 6 V e fios de ligação, podem-se montar os circuitos esquematizados abaixo. Em qual deles a lâmpada brilhará mais intensamente?

a)
b)
c)
d)
e)
T. 224 (PUC-SP) A resistência de um conjunto de n pilhas idênticas, de resistência interna r e força eletromotriz E é 10 Ω, quando associadas em série, e 0,4 Ω, quando associadas em paralelo. Nesse caso, r e n têm valores respectivamente iguais a:

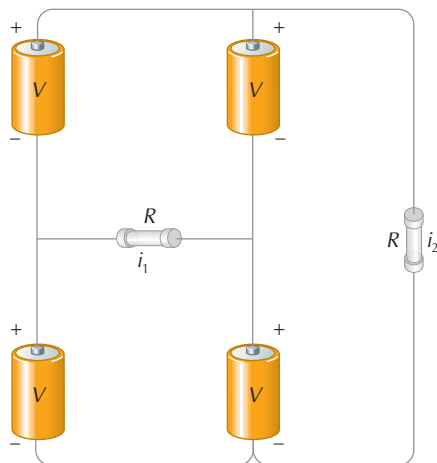
a) 2 Ω e 5
b) 5 Ω e 5
c) 4 Ω e 5
d) 5 Ω e 2
e) 2 Ω e 2

T. 225 (UEL-PR) Em telefones celulares são utilizadas, com frequência, baterias de níquel-metal hidreto onde são encontrados os seguintes dados técnicos: 4,8 V, 1.200 mAh. Eles nos dão, respectivamente, a voltagem de operação da bateria e sua capacidade de carga. Considerando que tais baterias são compostas de 4 pilhas de 1,2 V cada, pode-se afirmar:

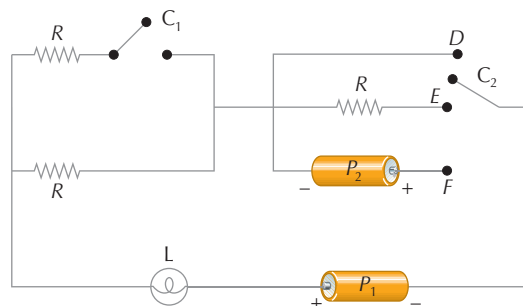
a) A bateria é composta de 2 celas que são ligadas em paralelo com 2 outras em série e tem uma carga disponível de 3.320 C que, se operada continuamente em 120 mA, duraria 1 h.
b) Na bateria, todas as celas estão ligadas em série e a carga disponível é de 4.320 C que, se operada continuamente em 120 mA, duraria 10 h.
c) Na bateria, todas as celas estão ligadas em paralelo e a carga disponível é de 3.320 C que, se operada continuamente em 120 mA, duraria 10 h.
d) A bateria é composta de 2 celas ligadas em paralelo com 2 outras em série e tem uma carga disponível de 4.320 C que, se operada continuamente em 120 mA, duraria 1 h.
e) Na bateria, 3 celas estão ligadas em série e 1 em paralelo e a carga disponível é de 3.320 C que, se operada continuamente em 120 mA, duraria 1 dia.

T. 226 (ITA-SP) No circuito desenhado a seguir, têm-se duas pilhas de 1,5 V cada, de resistências internas desprezíveis, ligadas em série, fornecendo corrente para três resistores com os valores indicados. Ao circuito estão ligados ainda um voltímetro e um amperímetro de resistências internas, respectivamente, muito alta e muito baixa.

As leituras desses instrumentos são, respectivamente:

a) 1,5 V e 0,75 A
b) 1,5 V e 1,5 A
c) 3,0 V e 0 A
d) 2,4 V e 1,2 A
e) outros valores que não os mencionados

T. 227 (Fuvest-SP) O circuito da figura é formado por 4 pilhas ideais de tensão *V* e dois resistores idênticos de resistência R.

Podemos afirmar que as correntes i_1 e i_2 indicadas na figura valem:

a) $i_1 = \frac{2V}{R}$ e $i_2 = \frac{4V}{R}$
b) $i_1 =$ zero e $i_2 = \frac{2V}{R}$
c) $i_1 = \frac{2V}{R}$ e $i_2 = \frac{2V}{R}$
d) $i_1 =$ zero e $i_2 = \frac{4V}{R}$
e) $i_1 = \frac{2V}{R}$ e $i_2 =$ zero

T. 228 (Vunesp) Três resistores idênticos, cada um deles com resistência *R*, duas pilhas P_1 e P_2 e uma lâmpada L estão dispostos como mostra a figura. Dependendo de como estão as chaves C_1 e C_2, a lâmpada L pode brilhar com maior ou menor intensidade, ou mesmo ficar apagada, como é a situação mostrada na figura.

Sabendo que em nenhum caso a lâmpada se queimará, podemos afirmar que brilhará com maior intensidade quando as chaves estiverem na configuração mostrada na alternativa:

a)

b)

c)

d)

e)

T. 229 (Mackenzie-SP) Uma bateria real está fornecendo máxima potência a um circuito externo. O rendimento da bateria, nessas condições, é:

a) 50%
b) 25%
c) 75%
d) 100%
e) diferente desses

T. 230 (Ufes) Nem toda a energia transformada em energia elétrica por um gerador é fornecida ao circuito externo. Parte da potência elétrica gerada é dissipada devido à resistência interna do gerador. Considere um gerador de fem E e resistência interna r. A intensidade de corrente elétrica para que a potência fornecida seja máxima e o valor dessa potência máxima são, respectivamente:

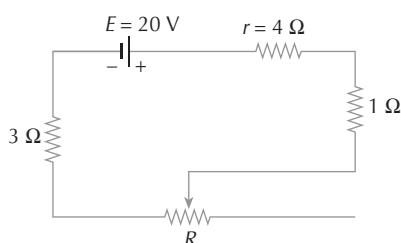
a) $\frac{E}{r}$ e $\frac{E^2}{r}$

b) $\frac{E}{2r}$ e $\frac{E^2}{r}$

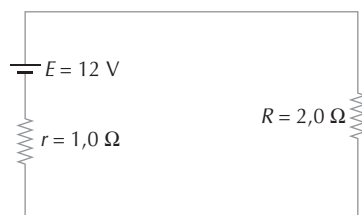
c) $\frac{E}{r}$ e $\frac{E^2}{4r}$

d) $\frac{E}{2r}$ e $\frac{E^2}{4r}$

e) $\frac{E^2}{r}$ e $\frac{E}{r}$

T. 231 (Uerj) No circuito abaixo, o gerador tem fem 20 V e resistência interna 4 Ω.

Para esse gerador lançar a máxima potência ao circuito externo, a resistência R do reostato deve ser igual a:

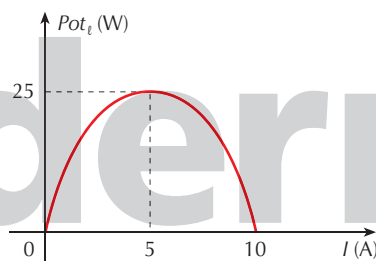
a) 0
b) ∞
c) 1 Ω
d) 4 Ω
e) um valor diferente dos anteriores

T. 232 (Unip-SP) Considere um gerador (E, r), ligado a um resistor (R).

Para que a potência útil do gerador seja máxima devemos associar ao resistor (R):

a) em série, um outro resistor de resistência elétrica 2,0 Ω.
b) em paralelo, um outro resistor de resistência elétrica 2,0 Ω.
c) em série, um outro resistor de resistência elétrica 1,0 Ω.
d) em paralelo, um outro resistor de resistência elétrica 1,0 Ω.
e) em paralelo, um resistor de resistência elétrica desprezível (curto-circuito).

T. 233 (UFSCar-SP) Deseja-se ferver água em um recipiente no menor tempo possível. Para isso, dispõe-se de uma bateria de fem 6 V e resistência interna 3 Ω, e de dois resistores, sendo um de 3 Ω e outro de 6 Ω. Para se conseguir esse propósito, é preciso:

a) usar somente o resistor de 3 Ω.
b) usar somente o resistor de 6 Ω.
c) associar os dois resistores em paralelo.
d) associar os dois resistores em série.
e) não utilizar nenhuma das disposições acima, mas fazer o curto-circuito entre os terminais da bateria.

T. 234 (Unirio-RJ)

O diagrama acima representa a curva de potência lançada de um gerador cuja força eletromotriz vale E e a resistência elétrica vale r. Os valores de E e r são, respectivamente:

a) 1,0 V e 10 Ω
b) 5,0 V e 1,0 Ω
c) 10 V e 1,0 Ω
d) 25 V e 5,0 Ω
e) 25 V e 10 Ω

UNIDADE B

Capítulo

10

Receptores elétricos

Receptor elétrico é um elemento de circuito que consome energia elétrica e a transforma em outra forma de energia que não é totalmente energia térmica.

10.1 Receptor. Força contraeletromotriz

Um receptor elétrico possui duas constantes características, independentemente do circuito a que estiver ligado: a força contraeletromotriz e a resistência interna.

10.2 Circuito gerador-receptor e gerador-receptor-resistor

Um circuito simples, formado por um gerador e um receptor, obedece à lei de Pouillet.

Os motores de automóveis elétricos e de eletrodomésticos como ventiladores, liquidificadores e furadeiras são exemplos de receptores elétricos. A energia elétrica por eles consumida é transformada principalmente em energia mecânica (rotação dos eixos), além de energia térmica.

Receptor. Força contraeletromotriz

Objetivos

- Conhecer a definição de receptor elétrico.
- Compreender o conceito de força contraeletromotriz.
- Conhecer os diversos tipos de receptores utilizados no dia a dia.
- Caracterizar potência elétrica fornecida, potência elétrica útil e potência elétrica dissipada internamente em um receptor elétrico.
- Conceituar rendimento elétrico de um receptor.
- Compreender a equação do receptor.
- Analisar a curva característica de um receptor.
- Compreender o significado de gerador reversível.

Termos e conceitos

- acumuladores
- carga e descarga da bateria

Existem aparelhos capazes de receber a energia elétrica e transformá-la em outras formas de energia que não sejam exclusivamente a energia térmica. Esses aparelhos denominam-se **receptores** e funcionam quando estão ligados a um circuito onde existe um ou mais geradores.

Na **figura 1** temos diversos exemplos de receptores. **Motores elétricos**, como o liquidificador, a batedeira e a furadeira da **figura 1A**, transformam energia elétrica em energia mecânica. **Acumuladores**, formados por placas de chumbo (**fig. 1B**) dentro de um eletrólito (ácido sulfúrico), transformam energia elétrica em energia química.

A

B

Figura 1. (A) Motores elétricos. (B) Acumuladores.

Pode-se concluir, então, que:

> Receptor elétrico é o aparelho que transforma energia elétrica em outra forma de energia que não seja exclusivamente a energia térmica.

Como o receptor recebe energia elétrica de um circuito, as cargas elétricas que constituem a corrente vão do potencial maior (polo positivo) para o potencial menor (polo negativo). Todavia, o receptor não poderá transformar toda a energia elétrica recebida em energia útil, não elétrica. Uma parte dessa energia dissipa-se na sua **resistência interna** (r'), de maneira análoga ao que ocorre dentro do gerador.

Para os receptores mais comuns em funcionamento, verifica-se que:

A potência elétrica útil do receptor é diretamente proporcional à intensidade de corrente que o atravessa.

Se Pot_u é a potência elétrica útil do receptor e i, a intensidade de corrente elétrica que o atravessa, temos:

$$Pot_u = E' \cdot i$$

em que E' é a constante de proporcionalidade, denominada **força contraeletromotriz (fcem)** do receptor. Então:

$$E' = \frac{Pot_u}{i}$$

Enquanto é recarregada num autoelétrico, a bateria funciona como um receptor.

Essa fórmula mostra que a fcem, do mesmo modo que a fem de um gerador, deve ser medida em volts (V) no Sistema Internacional.

Como, nos motores elétricos em geral, a potência mecânica é obtida pela rotação do eixo, um fato importante pode ocorrer. Se for impedida a rotação de seu eixo (eixo bloqueado por um freio, **figura 2**), não haverá transformação de energia elétrica em energia mecânica; daí $Pot_u = 0$ e, portanto, $E' = 0$. O motor comporta-se, então, como um resistor de resistência r'.

Na prática, se isso perdurar por muito tempo, o motor poderá ser danificado por aquecimento excessivo.

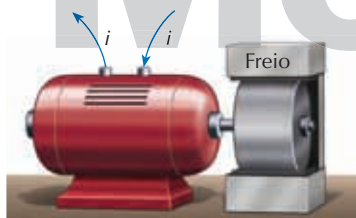



Figura 2. Ao se bloquear o eixo do motor elétrico, este se comporta como um resistor.

Em resumo:

Um **receptor** tem por função receber a corrente em seu potencial mais alto (polo positivo) e entregá-la em seu potencial mais baixo (polo negativo), retirando energia elétrica do circuito. Em funcionamento normal, o receptor apresenta duas constantes características, independentemente do circuito a que estiver ligado: a **fcem** E' (em volts) e a **resistência interna** r' (em ohms). O receptor é indicado da seguinte forma: (E', r').

Nos receptores, o sentido da corrente é do potencial maior para o potencial menor, isto é, do polo positivo para o polo negativo. A representação dos receptores é feita do mesmo modo que a dos geradores, diferindo apenas quanto ao sentido da corrente elétrica i (**fig. 3**): E' é a fcem e r', a resistência interna. Nos terminais M e N do receptor, ao contrário do que acontece em um gerador, a ddp U' é mantida por um aparelho externo.

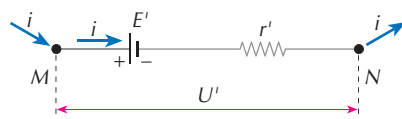



Figura 3. Representação esquemática de um receptor em um circuito elétrico.

1 As potências e o rendimento elétrico de um receptor

A **potência elétrica fornecida ao receptor** é: $Pot_f = U' \cdot i$

Parte dela é convertida em outra forma que não seja exclusivamente térmica (**fig. 4**). Essa parte é denominada **potência elétrica útil**, conforme discutido na página anterior:

$$Pot_u = E' \cdot i$$

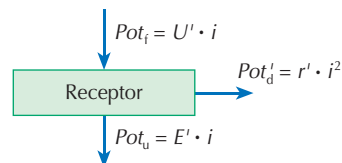



Figura 4. Esquema de potências em um receptor.

Sendo $Pot'_d = r' \cdot i^2$ a **potência elétrica dissipada internamente**, temos pelo princípio da conservação de energia que:

$$Pot_f = Pot_u + Pot'_d$$

O **rendimento elétrico** (η') do receptor é o quociente da potência elétrica útil pela potência elétrica fornecida ao receptor. Portanto:

$$\eta' = \frac{Pot_u}{Pot_f} \Rightarrow \eta' = \frac{E' \cdot i}{U' \cdot i} \Rightarrow \boxed{\eta' = \frac{E'}{U'}}$$

2 Equação do receptor

Sendo $Pot_f = Pot_u + Pot'_d$, temos:

$$U' \cdot i = E' \cdot i + r' \cdot i^2 \Rightarrow \boxed{U' = E' + r' \cdot i}$$

que é chamada **equação do receptor**.

Pode-se obter a equação do receptor, como na **figura 5**, considerando-se que a ddp U' entre os terminais seja o resultado do abaixamento de potencial E' e da queda de potencial $r' \cdot i$.

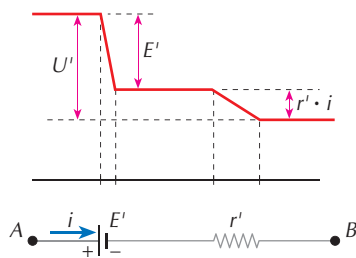



Figura 5. Potencial elétrico ao longo do receptor.

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

R. 98 Um motor elétrico, percorrido pela corrente elétrica de intensidade 10 A, transforma 80 W de potência elétrica em mecânica. Calcule a fcem desse motor.

Solução:

Sendo $i = 10$ A e $Pot_u = 80$ W, temos: $E' = \frac{Pot_u}{i} \Rightarrow E' = \frac{80}{10} \Rightarrow \boxed{E' = 8\text{ V}}$

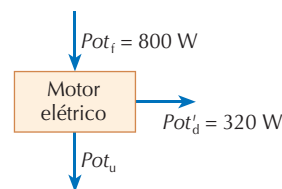
Resposta: 8 V

V3_P1_UN_B_CAP_10.indd 242 19.09.09 10:04:36

R. 99 Um motor elétrico recebe de um circuito a potência de 800 W, sob ddp de 100 V, e dissipa internamente uma potência elétrica de 320 W. Calcule a fcem E' e a resistência interna r' desse motor.

Solução:

A potência elétrica fornecida ao motor é a potência que ele recebe do circuito ($Pot_f = 800$ W) sob ddp $U' = 100$ V.
Como $Pot_f = U' \cdot i$, temos: $800 = 100i \Rightarrow i = 8$ A
Sendo dissipada internamente a potência $Pot'_d = 320$ W, tem-se:

$$Pot'_d = r' \cdot i^2 \Rightarrow 320 = r' \cdot 64 \Rightarrow r' = \frac{320}{64} \Rightarrow \boxed{r' = 5\ \Omega}$$

Notemos, no diagrama acima, que a potência elétrica útil do motor elétrico será:

$$Pot_u = Pot_f - Pot'_d \Rightarrow Pot_u = 800 - 320 \Rightarrow Pot_u = 480 \text{ W}$$

Assim, a fcem E' é dada por:

$$E' = \frac{Pot_u}{i} \Rightarrow E' = \frac{480}{8} \Rightarrow \boxed{E' = 60 \text{ V}}$$

Resposta: 60 V e 5 Ω

R. 100 Um motor elétrico está ligado sob uma ddp de 110 V. Verifica-se que ele é percorrido por corrente de intensidade 55 A com o eixo bloqueado e de intensidade 20 A em rotação plena. Determine a fcem E' e a resistência interna r' do motor.

Solução:

O motor elétrico com eixo bloqueado funciona como um resistor cuja resistência é igual à resistência interna do motor. Na figura I, abaixo, $U' = 110$ V, $i' = 55$ A.

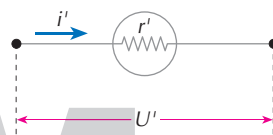



Figura I.

Então:

$$r' = \frac{U'}{i'} \Rightarrow r' = \frac{110}{55} \Rightarrow \boxed{r' = 2\ \Omega}$$

Quando o motor está em rotação plena, transforma potência elétrica em mecânica; então, a fcem E' é diferente de zero. Na figura II, $U' = 110$ V, $i = 20$ A e, pela equação do receptor, temos:

$$U' = E' + r' \cdot i \Rightarrow 110 = E' + 2 \cdot 20 \Rightarrow \boxed{E' = 70 \text{ V}}$$

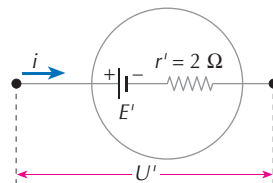



Figura II.

Resposta: 70 V e 2 Ω

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

P. 250 Um motor elétrico, de resistência interna 2 Ω, é ligado a uma ddp de 100 V. Constata-se que o motor é percorrido por uma corrente elétrica de 5 A.

a) Determine a fcem do motor.

b) Calcule a potência elétrica dissipada internamente.

c) O que acontece se impedirmos o eixo do motor de girar?

P. 251 Um motor elétrico tem fcem $E' = 100$ V. Ligado a uma ddp de 110 V, o motor dissipa internamente uma potência elétrica de 20 W. Determine a resistência interna do motor e a intensidade da corrente que o atravessa.

3 Curva característica de um receptor

A equação de um receptor, de constantes (E', r'):

$$U = E' + r' \cdot i = r' \cdot i + E'$$

é uma função do 1º grau entre a ddp e a corrente elétrica. Na **figura 6** temos a curva característica de um receptor: uma reta de coeficiente angular $+r'$ que corta o eixo das ordenadas no valor de sua fcem E'.

Note que a área do retângulo destacado é numericamente igual à potência elétrica útil do receptor: $Pot_u = E' \cdot i$

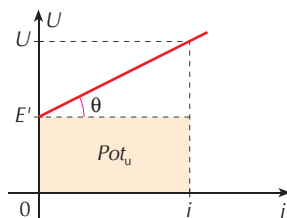
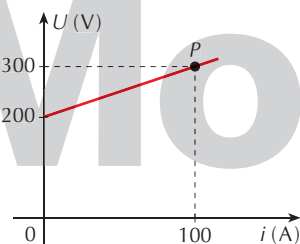



Figura 6. Curva característica de um receptor.

EXERCÍCIO RESOLVIDO

R. 101 A curva característica de um motor é representada no gráfico.

a) Calcule a fcem e a resistência interna desse motor.

b) Para o motor funcionando nas condições do ponto P, determine, em quilowatts-hora (kWh), a energia elétrica que o motor consome em 10 horas.

Solução:

a) Do gráfico, tira-se $\boxed{E' = 200\ V}$ e ponto P (100 A, 300 V) deve obedecer à equação do receptor. Logo:

$$U = E' + r' \cdot i \Rightarrow 300 = 200 + r' \cdot 100 \Rightarrow 100 \cdot r' = 100 \Rightarrow \boxed{r' = 1\ \Omega}$$

b) Nas condições do ponto P, a potência elétrica fornecida ao motor será:

$$Pot_f = U \cdot i \Rightarrow Pot_f = 300 \cdot 100 \Rightarrow Pot_f = 30.000\ W \Rightarrow Pot_f = 30\ kW$$

Em $\Delta t = 10$ h, a energia elétrica que o motor consome será:

$$E_{el.} = Pot_f \cdot \Delta t \Rightarrow E_{el.} = 30 \cdot 10 \Rightarrow \boxed{E_{el.} = 300\ kWh}$$

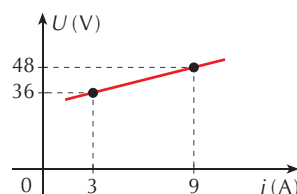
Resposta: a) 200 V e 1 Ω; b) 300 kWh

EXERCÍCIO PROPOSTO

P. 252 A tensão elétrica nos terminais de um receptor varia com a intensidade da corrente elétrica de acordo com o gráfico ao lado.

Determine:

a) a fcem e a resistência interna do receptor;

b) a energia elétrica que o receptor consome em 2 h quando sob tensão de 36 V. Dê a resposta em kWh.

4 Gerador reversível

Existem geradores que podem passar a funcionar como receptores devido à inversão do sentido da corrente: são os chamados **geradores reversíveis**. Dentre esses, destacam-se os acumuladores usados em automóveis*, que, normalmente, funcionam como geradores, transformando energia química em energia elétrica. Entretanto, durante o processo de recarga efetuado pelo dínamo, os acumuladores são submetidos a uma ddp maior que sua fem, sendo percorridos por corrente em sentido contrário, conforme mostra a curva característica da **figura 7**. Nessas condições, a fem age como fcem e a energia elétrica é transformada em energia química; desse modo, o acumulador passa a funcionar como receptor.

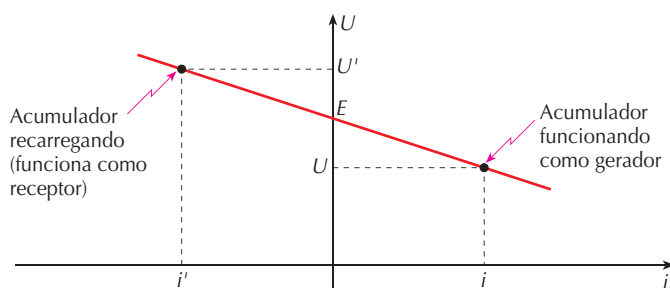



Figura 7. Curva característica de um gerador reversível.

EXERCÍCIO RESOLVIDO

R. 102 Uma bateria é atravessada pela corrente $i' = 10$ A e recebe do circuito externo a potência 110 W. Invertendo os terminais da bateria, a corrente passa a ser $i = 5$ A, passando a entregar, ao circuito externo, a potência 27,5 W. Determine a fcem (ou fem) e a resistência interna da bateria.

Solução:

Quando a corrente que atravessa a bateria é $i' = 10$ A, ela recebe a potência $Pot_r = 110$ W. Portanto, funciona como receptor e a ddp nos seus terminais será:

$$Pot_r = U' \cdot i' \Rightarrow 110 = U' \cdot 10 \Rightarrow U' = 11 \text{ V}$$

Como $U' = E + r \cdot i'$, temos: $11 = E + 10r$ ①

Invertendo os terminais, a corrente passa a ser $i = 5$ A e a bateria lança a potência $Pot_\ell = 27{,}5$ W. Desse modo, funciona como gerador e a ddp nos seus terminais será:

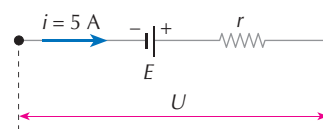
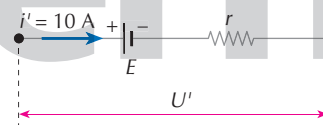
$$Pot_\ell = U \cdot i \Rightarrow 27{,}5 = U \cdot 5 \Rightarrow U = 5{,}5 \text{ V}$$

De $U = E - r \cdot i$, temos: $5{,}5 = E - 5r$ ②

Resolvendo o sistema formado por ① e ②, temos:

$$\begin{cases} 11 = E + 10r \\ 5{,}5 = E - 5r \ (\times 2) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 11 = E + 10r \\ 11 = 2E - 10r \end{cases} + \quad 22 = 3E \Rightarrow 3E = 22 \Rightarrow E = \frac{22}{3} \Rightarrow \boxed{E \simeq 7{,}3 \text{ V}}$$

$$\text{Substituindo em ①, temos: } 11 = \frac{22}{3} + 10r \Rightarrow 10r = \frac{11}{3} \Rightarrow r = \frac{11}{30} \Rightarrow \boxed{r \simeq 0{,}37\ \Omega}$$

Resposta: 7,3 V e 0,37 Ω

EXERCÍCIO PROPOSTO

P. 253 A diferença de potencial entre os terminais de uma bateria, funcionando como gerador, é de 15 V e a intensidade da corrente elétrica que a percorre é de 3 A. Funcionando como receptor, essa bateria, quando sob diferença de potencial de 20 V, é percorrida por uma corrente de intensidade 2 A. Determine a resistência interna da bateria e sua fem (ou fcem).

* As baterias de automóveis podem funcionar como geradores, durante a descarga, ou como receptores, quando são recarregadas. Na página 250, veja como ocorre o processo de descarga e carga de uma bateria.

V3_P1_UN_B_CAP_10.indd 245 19.09.09 10:04:39

Seção 10.2

Circuito gerador-receptor e gerador-receptor-resistor

Objetivos

- Analisar um circuito gerador-receptor e circuito gerador--receptor-resistor.
- Compreender a lei de Pouillet para o circuito gerador--receptor e para o circuito simples gerador--receptor-resistor.

Termos e conceitos

- bateria de chumbo

Considere o circuito simples formado pelo gerador (E, r), pelo receptor (E', r') e por fios de ligação de resistência elétrica desprezível (**fig. 8**). O gerador é o elemento que possui maior valor de E e, portanto, impõe o sentido da corrente elétrica. No circuito em questão, $E > E'$. A ddp nos terminais do gerador $U = E - r \cdot i$ é a mesma nos terminais do receptor $U' = E' + r' \cdot i$.

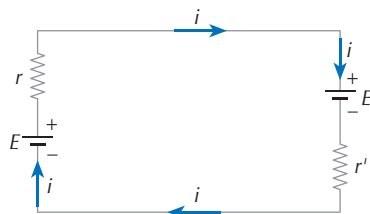



Figura 8. Circuito simples formado por um gerador e um receptor.

Portanto:

$$U = U' \Rightarrow E - r \cdot i = E' + r' \cdot i \Rightarrow$$

$$\Rightarrow E - E' = (r + r') \cdot i \Rightarrow \boxed{i = \frac{E - E'}{r + r'}}$$

Essa fórmula constitui a **lei de Pouillet** para o circuito gerador--receptor.

Quando o circuito simples é formado por um gerador (E, r), um resistor (R), um receptor (E', r') e fios de ligação de resistência elétrica desprezível (**fig. 9**), a lei de Pouillet é dada pela fórmula:

$$\boxed{i = \frac{E - E'}{R + r + r'}}$$

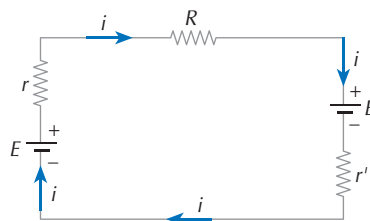



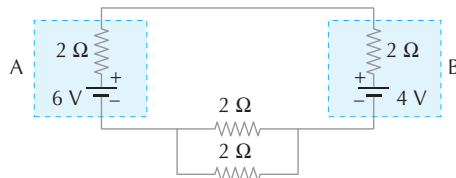
Figura 9. Circuito simples formado por um gerador, um resistor e um receptor.

Se o circuito simples for constituído de geradores, receptores e resistores, a intensidade da corrente elétrica será dada por:

$$\boxed{i = \frac{\Sigma E - \Sigma E'}{\Sigma R}}$$

em que ΣE é a soma das fem, $\Sigma E'$ é a soma das fcem e ΣR é a soma das resistências internas dos geradores e receptores e dos resistores do circuito.

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

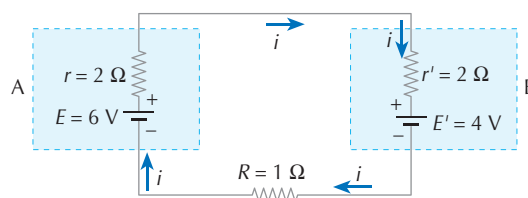
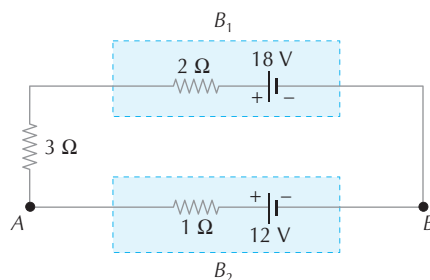
R. 103 No circuito da figura, A é um gerador e B, um receptor. Calcule a intensidade da corrente elétrica que atravessa o gerador.

Solução:
O gerador A (6 V, 2 Ω) tem fem $E = 6$ V e resistência interna $r = 2\ \Omega$, e o receptor B (4 V, 2 Ω), fcem $E' = 4$ V e resistência interna $r' = 2\ \Omega$. Para utilizarmos a lei de Pouillet, o circuito não deve ter ligações em paralelo. Assim, substituímos a associação de resistores iguais em paralelo pela sua resistência equivalente:

$$R = \frac{2 \cdot 2}{2 + 2} \Rightarrow R = 1\ \Omega$$

Desse modo, pela lei de Pouillet, temos:

$$i = \frac{E - E'}{R + r + r'} \Rightarrow i = \frac{6 - 4}{1 + 2 + 2} = \frac{2}{5} \Rightarrow \boxed{i = 0{,}4\ \text{A}}$$

Resposta: 0,4 A

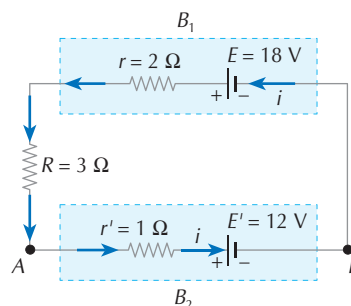
Observação:
Quando em um circuito não se informa qual é o gerador e o receptor, devem-se analisar os valores das fems e das fcems. Num circuito como o do exercício, será fem a que tiver maior valor e, consequentemente, o aparelho funcionará como gerador.

R. 104 O circuito apresenta duas baterias, B_1 e B_2, e um resistor.

Determine:
a) a intensidade da corrente elétrica que atravessa o circuito;
b) a ddp entre os pontos A e B.

Solução:
a) A bateria B_1, por ter maior valor de E (18 V), é o gerador. O sentido da corrente é do polo negativo para o polo positivo. Nessas condições, na bateria B_2 o sentido da corrente é do polo positivo para o polo negativo e ela funciona como um receptor.
Pela lei de Pouillet, temos:

$$i = \frac{E - E'}{R + r + r'} \Rightarrow i = \frac{18 - 12}{3 + 2 + 1} \Rightarrow i = \frac{6}{6} \Rightarrow \boxed{i = 1\ \text{A}}$$

b) Entre os pontos A e B temos um receptor. Logo:

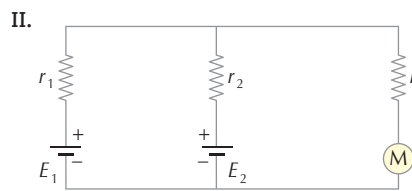
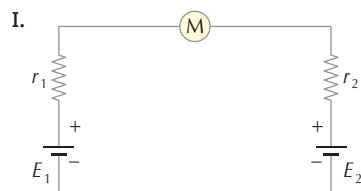
$$U_{AB} = E' + r' \cdot i \Rightarrow U_{AB} = 12 + 1 \cdot 1 \Rightarrow \boxed{U_{AB} = 13\ \text{V}}$$

Resposta: a) 1 A; b) 13 V

R. 105 Duas pilhas elétricas apresentam as seguintes características: (E_1 = 1,53 V, r_1 = 15 Ω) e (E_2 = 1,47 V, r_2 = 15 Ω).

a) Ligando-as conforme o circuito I, calcule a indicação do miliamperímetro M ideal.

b) Ligando-as em paralelo e fechando o circuito com um resistor R = 367,5 Ω em série com o miliamperímetro M, verifica-se que este indica 4 mA (circuito II). Calcule as correntes elétricas nas pilhas E_1 e E_2.

I.

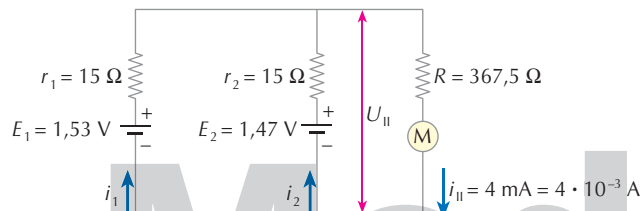
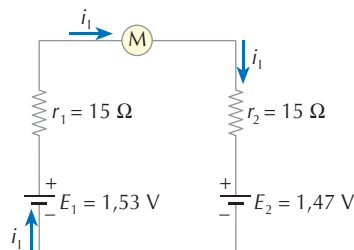
II.

Solução:

a) A pilha de maior fem funciona como gerador.
Pela lei de Pouillet:

$$i_I = \frac{E_1 - E_2}{r_1 + r_2} = \frac{1{,}53 - 1{,}47}{15 + 15} = \frac{0{,}06}{30} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow i_I = 0{,}002 \text{ A} \Rightarrow \boxed{i_I = 2 \text{ mA}}$$

b) Pela lei de Ohm, no resistor R temos:

$$U_{II} = R \cdot i_{II} \Rightarrow U_{II} = 367{,}5 \cdot 4 \cdot 10^{-3} \Rightarrow U_{II} = 1{,}47 \text{ V}$$

Em cada gerador associado, apliquemos a equação do gerador:

$$U_{II} = E_2 - r_2 \cdot i_2 \Rightarrow 1{,}47 = 1{,}47 - 15 \cdot i_2 \Rightarrow \boxed{i_2 = 0}$$

$$U_{II} = E_1 - r_1 \cdot i_1 \Rightarrow 1{,}47 = 1{,}53 - 15 \cdot i_1 \Rightarrow 15 \cdot i_1 = 0{,}06 \Rightarrow i_1 = 0{,}004 \text{ A} \Rightarrow \boxed{i_1 = 4 \text{ mA}}$$

Resposta: a) 2 mA; b) i_1 = 4 mA e i_2 = 0

Observação:
No circuito I, o gerador de menor fem funciona como receptor, enquanto no circuito II esse gerador não é percorrido por corrente elétrica.
O circuito II é um exemplo que justifica o fato de não termos analisado associação em paralelo de geradores de fems diferentes.

R. 106 Um gerador de fem 110 V e resistência interna 1 Ω alimenta um circuito que corresponde, em série, a um motor de resistência interna 1 Ω e um resistor de 9 Ω. Esse resistor é imerso em um recipiente, contendo 1.125 g de água a 20 °C. Calcule em quanto tempo a água entrará em ebulição, quando o eixo do motor for impedido de girar por um meio qualquer. (Dados: calor específico da água = 1 cal/g · °C e 1 cal = 4,2 J)

Solução:
O circuito pode ser esquematizado como na figura ao lado. Impedindo-se o eixo do motor de girar (E′ = 0) e, pela lei de Pouillet, temos:

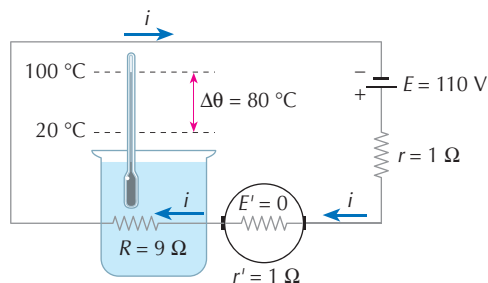
$$i = \frac{E}{R + r + r'} \Rightarrow i = \frac{110}{9 + 1 + 1} \Rightarrow i = \frac{110}{11} \Rightarrow i = 10 \text{ A}$$

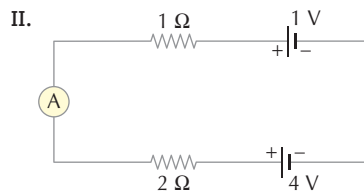
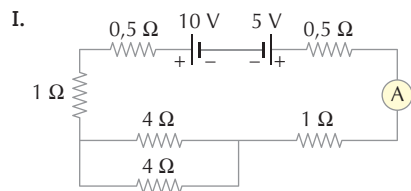
A energia elétrica consumida pelo resistor é transformada em calor, levando a água à ebulição:

$$E_{el.} = Q \Rightarrow Pot \cdot \Delta t = mc \cdot \Delta\theta \Rightarrow R \cdot i^2 \cdot \Delta t = mc \cdot \Delta\theta$$

Sendo R = 9 Ω, i = 10 A, *m* = 1.125 g, *c* = $1 \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot °\text{C}} = 4{,}2 \frac{\text{J}}{\text{g} \cdot °\text{C}}$ e Δθ = 80 °C, temos:

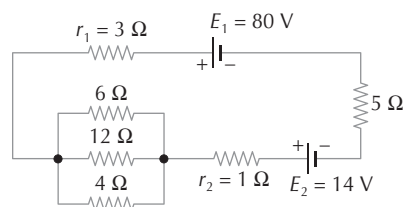
$$9 \cdot 10^2 \cdot \Delta t = 1.125 \cdot 4{,}2 \cdot 80 \Rightarrow \Delta t = 420 \text{ s} \Rightarrow \boxed{\Delta t = 7 \text{ min}}$$

Resposta: 7 min

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

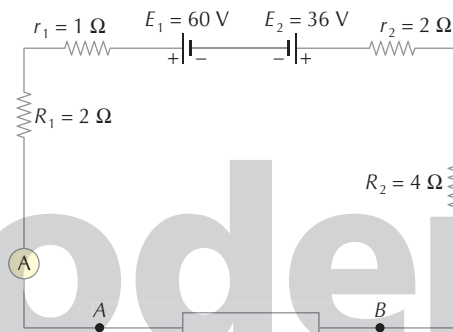
P. 254 Dados os circuitos I e II, determine as indicações do amperímetro A ideal.

P. 255 Considere o circuito da figura. Calcule:

a) a potência elétrica dissipada no resistor de 5 Ω;

b) a intensidade de corrente elétrica no resistor de 6 Ω;

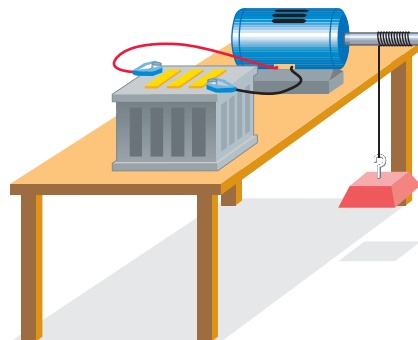
c) as ddps no gerador e no receptor.

P. 256 No circuito indicado, A é um amperímetro ideal e indica 1,2 A.

a) Supondo que *AB* seja um resistor, calcule sua resistência elétrica.

b) Supondo que *AB* seja um receptor de resistência interna 1 Ω, calcule a sua fcem.

P. 257 (UFV-MG) Um motor elétrico é fixado à borda de uma mesa com uma corda presa a seu eixo, de modo a levantar um peso de 100 N a uma altura de 0,50 m em 10 s, com velocidade constante, conforme figura. O motor é conectado a uma bateria de 10 V por meio de fios, de forma que todo o circuito tem a resistência de 5,0 Ω. Estando o motor realizando essa tarefa, determine:

a) a potência por ele desenvolvida;

b) a corrente que percorre o circuito;

c) a força contraeletromotriz do motor.

P. 258 Um circuito compreende um gerador de fem 42 V e resistência interna 4 Ω, em série com um motor elétrico e um resistor de 4,19 Ω imerso em um calorímetro. Constata-se que:

I. impedindo-se a rotação do motor, desprendem-se, no calorímetro, 540 cal/min;

II. quando o motor está em rotação plena, a quantidade de calor no calorímetro é de 15 cal/min.

Considerando 1 cal = 4,19 J, determine a fcem e a resistência interna do motor elétrico.

P. 259 (UFSCar-SP) É dado um circuito de duas pilhas idênticas ligadas em série e uma resistência externa de 10 Ω. Cada pilha tem fem igual a 1,5 V e resistência interna 2,5 Ω. Seja *i* a intensidade de corrente do circuito. Quando se acrescenta uma terceira pilha em série com as duas primeiras:

I. a intensidade de corrente não se altera, se ela for ligada em série com a mesma polaridade;

II. a nova intensidade de corrente é $\frac{i}{2}$, se ela for ligada em série com a polaridade oposta.

Determine as características da terceira pilha.

A bateria de chumbo

A bateria de chumbo, utilizada, por exemplo, nos automóveis, é constituída de várias pilhas, associadas em série. Cada pilha é formada de placas alternadas de chumbo (Pb) e de dióxido de chumbo (PbO_2)*. O conjunto encontra-se imerso numa solução diluída de ácido sulfúrico. As placas de chumbo são ligadas entre si, constituindo o ânodo ou polo negativo. As placas de dióxido de chumbo, ligadas entre si, constituem o cátodo ou polo positivo.

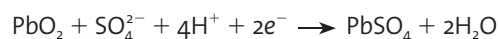
Cada pilha fornece uma tensão de 2 V. Uma bateria de 12 V contém seis pilhas associadas em série.

Durante a **descarga** da bateria, isto é, durante a fase em que a bateria funciona como gerador, ocorrem as seguintes reações químicas:

- **ânodo**

$Pb^0 + SO_4^{2-} \longrightarrow PbSO_4 + 2e^-$

- **cátodo**

$PbO_2 + SO_4^{2-} + 4H^+ + 2e^- \longrightarrow PbSO_4 + 2H_2O$

Os íons SO_4^{2-} e H^+ são fornecidos pelo H_2SO_4 ($H_2SO_4 \longrightarrow 2H^+ + SO_4^{2-}$).

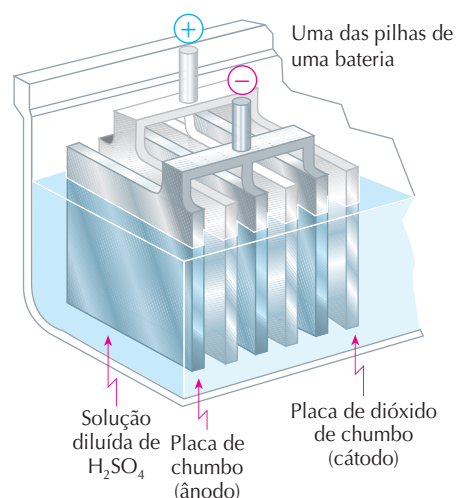
O sulfato de chumbo ($PbSO_4$) formado em cada reação adere à respectiva placa.

Cada átomo de chumbo do ânodo que participa da reação libera dois elétrons que atravessam o circuito externo à bateria, sendo capturados pelo cátodo. Tem-se, assim, a corrente elétrica.

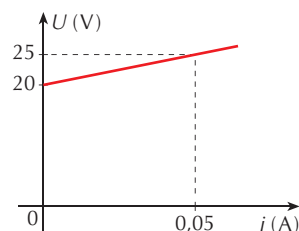
Nessas reações, o ácido sulfúrico vai sendo consumido e consequentemente diminui a densidade da solução. Por isso, para testar a bateria, usa-se um densímetro. A densidade ideal da solução deve ser de 1,28 g/cm³.

Baterias desse tipo são geradores reversíveis, isto é, podem ser **recarregadas**. Para isso, liga-se, em oposição com a bateria, um gerador de corrente contínua que aplica à bateria uma ddp maior do que sua fem. A bateria passa a funcionar como receptor.

As reações anteriores se invertem: um eletrodo se recobre de chumbo e o outro, de dióxido de chumbo. Na solução aumenta a concentração de ácido sulfúrico.

Durante a descarga, energia química se transforma em energia elétrica e, na carga, energia elétrica se transforma em energia química. No caso dos automóveis, é o dínamo que, de um modo automático, faz o recarregamento da bateria.

EXERCÍCIOS PROPOSTOS DE RECAPITULAÇÃO

P. 260 (Covest-PE) O motor elétrico de uma bomba-d'água é ligado a uma rede elétrica que fornece uma diferença de potencial de 220 V. Em quantos segundos o motor da bomba consome uma energia de 35,2 kJ, se por ele circula uma corrente elétrica de 2 A?

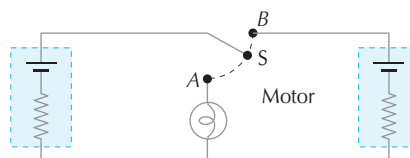
P. 261 (Olimpíada Brasileira de Física) A tensão nos terminais de um motor elétrico varia com a intensidade da corrente, conforme o gráfico ao lado.
Se o rendimento desse motor for de 50%, calcule a corrente que o percorre.

* As placas de dióxido de chumbo, na verdade, são constituídas por placas de chumbo recobertas por uma película de dióxido de chumbo (PbO_2).

P. 262 (UFU-MG) Uma bateria de fem 220 V e resistência de 10 Ω está acoplada, conforme o circuito da figura, ou a uma lâmpada de 100 Ω de resistência ou a um motor de fcem 205 V com resistência interna de 5 Ω, dependendo de a conexão da chave S estar em *A* ou *B*.

Pede-se:

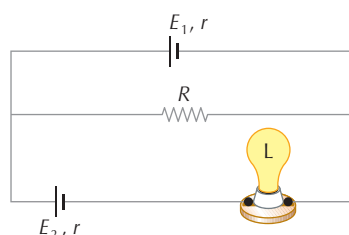
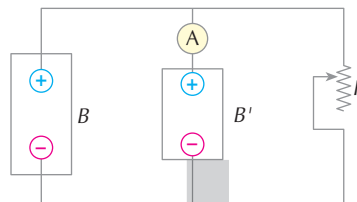
a) a potência consumida pela lâmpada;

b) a potência útil do motor;

c) a potência dissipada por efeito Joule no motor.

P. 263 (FEI-SP) Com uma bateria de fem $E_1 = 21$ V e resistência interna $r_1 = 3{,}0$ Ω, deseja-se acionar um pequeno motor de corrente contínua de fcem $E_2 = 5{,}0$ V e resistência interna $r_2 = 2{,}0$ Ω. Despreze a resistência dos fios de ligação e calcule a resistência que deve ser associada em paralelo com o motor para que a corrente nele seja de 2,0 A.

P. 264 (Unicamp-SP) No circuito da figura, as baterias têm fem $E_1 = 4$ V, $E_2 = 2$ V e ambas têm resistência interna $r = 1$ Ω.

a) Para que valor da resistência *R* a lâmpada *L* do circuito não se acende, isto é, pode-se considerar a corrente através de *L* como sendo nula?

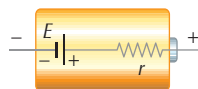
b) Com a lâmpada *L* apagada, qual é o valor da corrente que passa por *R*?

P. 265 (PUC-SP) Duas baterias, *B* e *B'*, formada a primeira de 5 elementos e a segunda de 4 elementos, todos iguais, estão ligadas num circuito, conforme o esquema ao lado. Nesse circuito, A é um amperímetro ideal e *R*, um reostato. Quando *R* = 1 Ω, a indicação do amperímetro é zero. Calcule a resistência interna de cada elemento.

P. 266 (UFPA) Uma lâmpada de resistência igual a 117 Ω é ligada em série a um motor de força contraeletromotriz igual a 60 V e resistência interna igual a 1 Ω, sendo ambos ligados também em série a um gerador de força eletromotriz igual a 120 V e resistência interna igual a 2 Ω. Com o circuito em funcionamento, pergunta-se:

a) Qual o valor, em ampère, da corrente circulante?

b) Se bloquearmos mecanicamente o eixo do motor, impedindo o seu giro, o brilho da lâmpada aumenta, diminui ou não se altera?

c) Na situação ainda do item **b**, qual o valor, em ampère, da corrente elétrica circulante?

P. 267 (Fuvest-SP) As características de uma pilha, do tipo PX, estão apresentadas no quadro a seguir, tal como fornecidas pelo fabricante.

> Uma pilha, do tipo PX, pode ser representada, em qualquer situação, por um circuito equivalente, formado por um gerador ideal de força eletromotriz *E* = 1,5 V e uma resistência interna $r = \frac{2}{3}$ Ω, como representado no esquema abaixo.
>
>
>

Três dessas pilhas foram colocadas para operar, em série, em uma lanterna que possui uma lâmpada L, com resistência constante $R_L = 3{,}0$ Ω. Por engano, uma das pilhas foi colocada invertida, como representado abaixo:

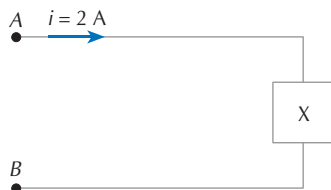
Determine:

a) A corrente *I*, em ampères, que passa pela lâmpada, com a pilha 2 "invertida", como na figura.

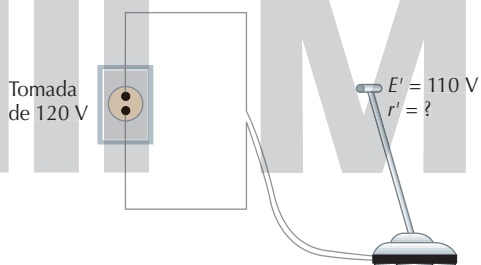
b) A potência *Pot*, em watts, dissipada pela lâmpada, com a pilha 2 "invertida", como na figura.

c) A razão $F = \frac{Pot}{Pot_0}$, entre a potência *Pot* dissipada pela lâmpada, com a pilha 2 "invertida", e a potência Pot_0, que seria dissipada, se todas as pilhas estivessem posicionadas corretamente.

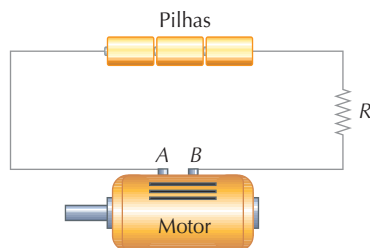
TESTES PROPOSTOS

T. 235 Na figura, tem-se um trecho de circuito elétrico onde a ddp entre os pontos A e B é 100 V e a corrente com sentido indicado tem intensidade 2 A.

Dentro da caixa X pode existir:

a) um gerador de fem 150 V e resistência interna 10 Ω.
b) um receptor de fcem 120 V e resistência interna 5 Ω.
c) três resistores de 150 Ω cada, associados em série.
d) três resistores de 150 Ω cada, associados em paralelo.
e) um conjunto diferente dos anteriores.

T. 236 (PUC-SP) A figura esquematiza o circuito elétrico de uma enceradeira em funcionamento.

A potência elétrica dissipada por ela é de 20 W e sua fcem 110 V. Assim, sua resistência interna é de:

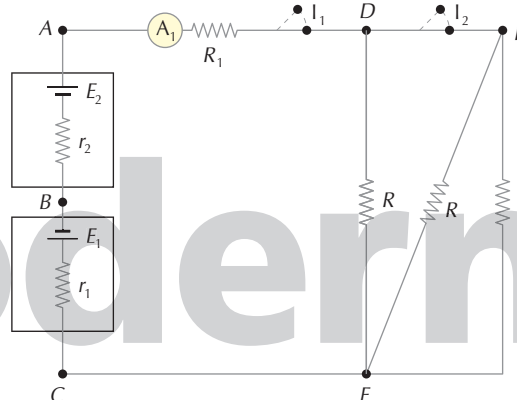
a) 5,0 Ω
b) 55 Ω
c) 2,0 Ω
d) 115 Ω
e) −5,0 Ω

T. 237 (UFRGS-RS) O circuito abaixo representa três pilhas ideais de 1,5 V cada uma, um resistor R de resistência elétrica 1,0 Ω e um motor, todos ligados em série. (Considere desprezível a resistência elétrica dos fios de ligação do circuito.)

A tensão entre os terminais A e B do motor é 4,0 V. Qual é a potência elétrica consumida pelo motor?

a) 0,5 W
b) 1,0 W
c) 1,5 W
d) 2,0 W
e) 2,5 W

T. 238 (Cesgranrio-RJ) Um motor M, de força contraeletromotriz igual a 54 V e resistência interna 9,0 Ω, é ligado a um gerador de força eletromotriz de 80 V e resistência interna de 4,0 Ω. Nessas condições, a intensidade da corrente elétrica estabelecida no circuito valerá, em ampères:

a) 2,0
b) 3,4
c) 5,2
d) 6,0
e) 7,8

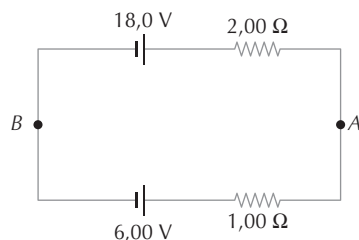
T. 239 (UFSC) No circuito mostrado na figura, A_1 é um amperímetro e I_1 e I_2 são interruptores do circuito. Suponha que os interruptores estejam fechados e que $E_1 = 2$ V, $E_2 = 5$ V, $R_1 = 3$ Ω, $R = 9$ Ω, $r_1 = 2$ Ω e $r_2 = 1$ Ω.

Assinale a(s) proposição(ões) correta(s).

(01) A diferença de potencial entre A e B é maior que o valor da força eletromotriz E_2.
(02) A diferença de potencial entre C e B é maior que o valor da força eletromotriz E_1.
(04) A diferença de potencial entre D e E é igual à diferença de potencial entre F e E.
(08) O amperímetro A_1 registra a mesma corrente, esteja com o interruptor I_2 aberto ou fechado.
(16) Abrindo-se o interruptor I_1, a diferença de potencial entre A e B é igual ao valor da força eletromotriz E_2.

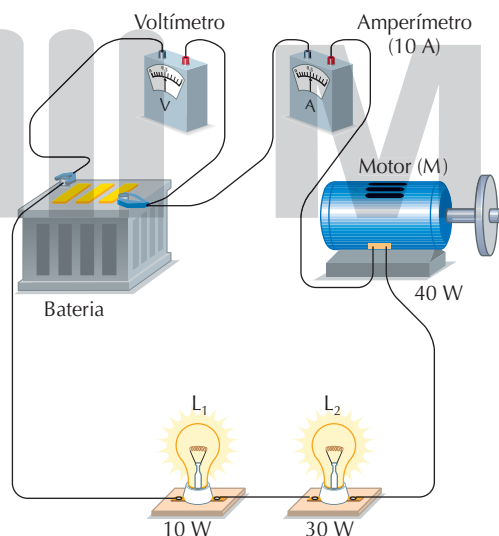
Dê como resposta a soma dos números que precedem as afirmativas corretas.

T. 240 (AFA-SP) Um motor elétrico tem resistência interna de 2 Ω, força contraeletromotriz de 100 V e é percorrido por uma corrente de 5 A, quando está em rotação plena. Se o eixo do motor for travado, mantida a mesma tensão elétrica, a corrente que passará por ele valerá:

a) 20 A
b) 25 A
c) 36 A
d) 55 A

T. 241 (ITA-SP) As duas baterias da figura estão ligadas em oposição.

Suas fems e resistências internas são, respectivamente: 18,0 V e 2,00 Ω; 6,00 V e 1,00 Ω, sendo i a corrente no circuito, V_{AB} a tensão $V_A - V_B$ e Pot_d a potência total dissipada, podemos afirmar que:

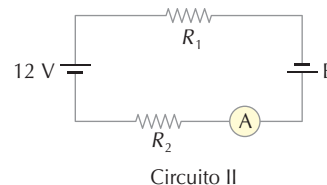
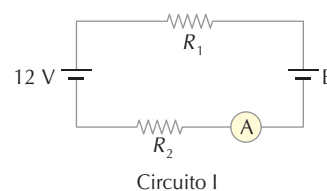
a) $i = 9{,}00$ A; $V_{AB} = -10{,}0$ V; $Pot_d = 12{,}0$ W
b) $i = 6{,}00$ A; $V_{AB} = 10{,}0$ V; $Pot_d = 96{,}0$ W
c) $i = 4{,}00$ A; $V_{AB} = -10{,}0$ V; $Pot_d = 16{,}0$ W
d) $i = 4{,}00$ A; $V_{AB} = 10{,}0$ V; $Pot_d = 48{,}0$ W
e) $i = 4{,}00$ A; $V_{AB} = 24{,}0$ V; $Pot_d = 32{,}0$ W

T. 242 (UFMG) Nessa figura, são indicadas as potências fornecidas ao motor e às duas lâmpadas, todos ligados a uma mesma bateria, bem como a leitura do amperímetro introduzido no circuito. Sabe-se que a força eletromotriz da bateria é 12 V e que o voltímetro e o amperímetro são ideais.

A resistência interna r da bateria e a leitura do voltímetro valem:

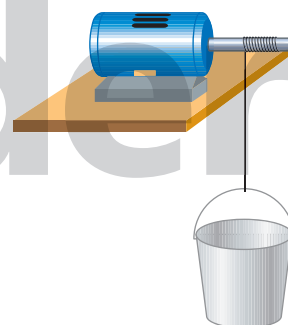
a) $r = 0\ \Omega$ e $U = 12$ V
b) $r = 0\ \Omega$ e $U = 80$ V
c) $r = 0{,}4\ \Omega$ e $U = 8$ V
d) $r = 0{,}8\ \Omega$ e $U = 12$ V
e) $r = 10\ \Omega$ e $U = 80$ V

T. 243 (UFC-CE) Os circuitos I e II da figura foram montados para a determinação do valor da força eletromotriz, fem, da bateria B. Neles foram utilizados os mesmos componentes elétricos. Na montagem do circuito I, o amperímetro A indicou uma corrente $I_1 = 1$ A e, na montagem do circuito II, indicou uma corrente $I_2 = 3$ A.

Circuito I

Circuito II

As resistências internas das duas baterias e do amperímetro são de valor desprezível. O valor da fem da bateria B é:

a) 18 V
b) 15 V
c) 12 V
d) 9 V
e) 6 V

T. 244 (UFPR) Em uma construção, é utilizado um motor de corrente contínua para elevar baldes contendo argamassa, conforme a figura abaixo. O motor funciona sob uma tensão de 20 V e o seu rendimento é de 70%.

Supondo-se que um balde de argamassa possua 28 kg e que esteja sendo elevado à velocidade constante de 0,5 m/s, considerando-se a aceleração da gravidade igual a 10 m/s^2, o módulo da intensidade de corrente elétrica no motor é:

a) 10 A
b) 14 A
c) 7,0 A
d) 4,9 A
e) 0,7 A

T. 245 (Vunesp) Uma bateria de 50 pilhas, cada uma das quais de fem 2,3 V e resistência interna 0,10 ohm, deve ser carregada numa fonte de corrente contínua de 210 V e resistência interna desprezível. A corrente máxima que pode circular pelo sistema é 6,0 A. Qual é a resistência extra que deve ser inserida no circuito?

a) 10,8 ohms
b) 30 ohms
c) 20,9 ohms
d) 15,9 ohms
e) 35 ohms

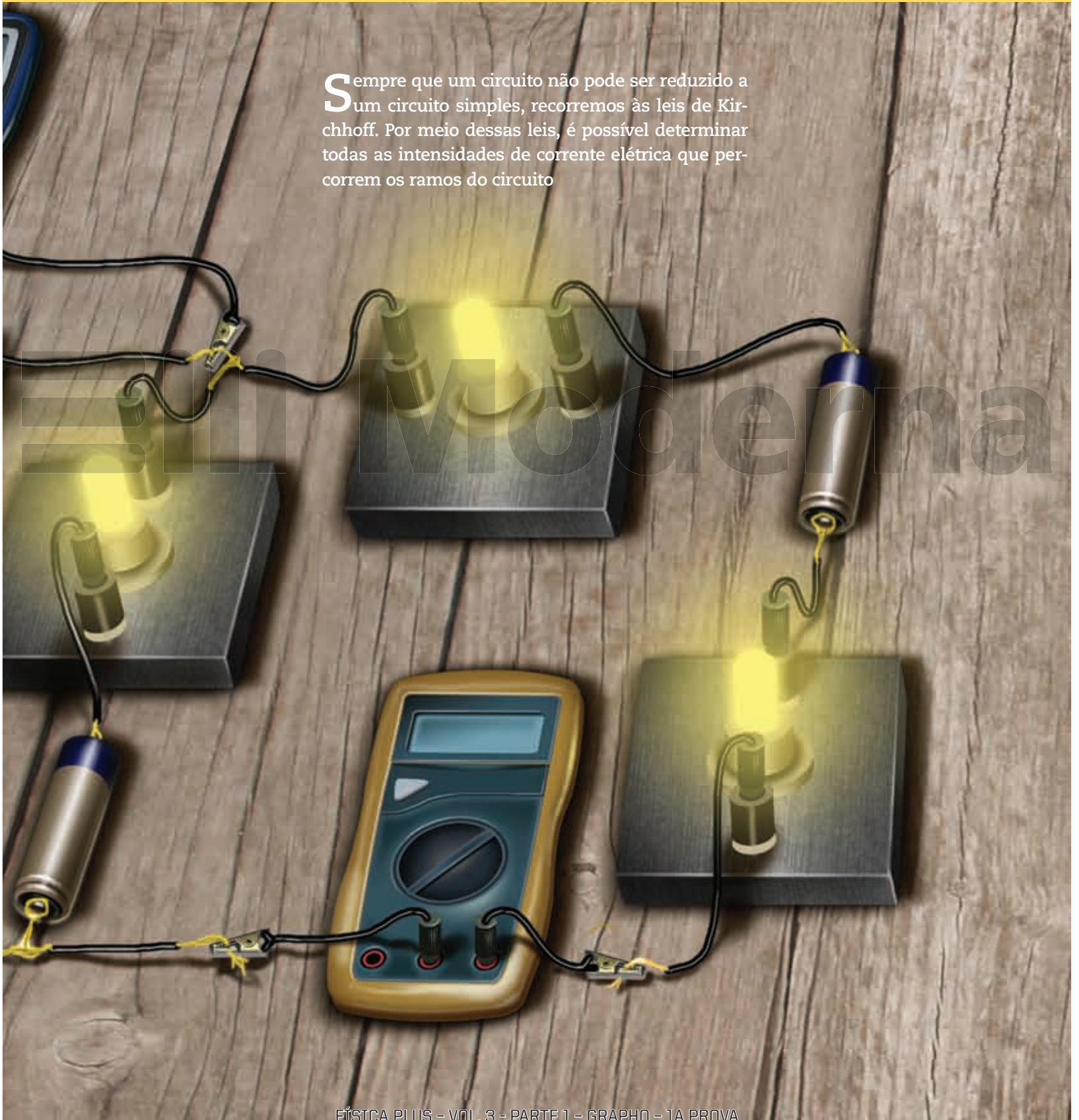
UNIDADE B

Capítulo 11

As leis de Kirchhoff

As leis de Kirchhoff são utilizadas para determinar a intensidade da corrente elétrica em circuitos que não podem ser convertidos em circuitos simples.

Sempre que um circuito não pode ser reduzido a um circuito simples, recorremos às leis de Kirchhoff. Por meio dessas leis, é possível determinar todas as intensidades de corrente elétrica que percorrem os ramos do circuito

Seção 11.1

As leis de Kirchhoff

Objetivos

- Compreender as leis de Kirchhoff.
- Aplicar as leis de Kirchhoff para os circuitos elétricos.

Termos e conceitos

- ramo
- malha

A lei de Pouillet permite determinar a intensidade de corrente num circuito simples. Quando o circuito não pode ser reduzido a um circuito simples, para a determinação de todas as intensidades de corrente elétrica recorre-se às chamadas **leis de Kirchhoff***: **lei dos nós** e **lei das malhas**.

Considere uma **rede elétrica** constituída de dois geradores, (E_1, r_1) e (E_2, r_2), de um receptor, (E_3, r_3), e de resistores de resistências elétricas, R_1, R_2 e R_3 (**fig. 1**).

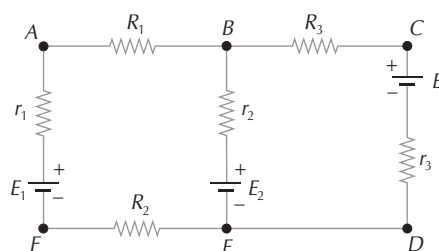



Figura 1. Rede elétrica.

Numa rede elétrica chama-se **nó** o ponto no qual a corrente elétrica se divide. No exemplo dado, *B* e *E* são nós. Os trechos de circuito entre dois nós consecutivos são denominados **ramos**. Na rede elétrica dada, os ramos são três: *BAFE*, *BE* e *BCDE*.

Qualquer conjunto de ramos formando um percurso fechado recebe o nome de **malha**. No circuito em questão as malhas são: *ABEFA*, *BCDEB* e *ABCDEFA*.

A cada ramo do circuito atribuímos um sentido de corrente elétrica (**fig. 2**). Esse sentido, embora arbitrário, deve ser coerente com o elemento de circuito do ramo. Sendo gerador, a corrente entra pelo terminal negativo e, sendo receptor, pelo positivo.

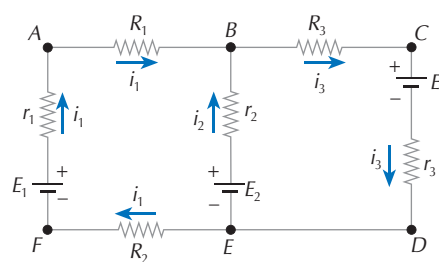



Figura 2.

A **primeira lei de Kirchhoff** ou **lei dos nós** estabelece:

> Em um nó, a soma das intensidades de corrente que chegam é igual à soma das intensidades de corrente que saem.

* **KIRCHHOFF**, Gustav Robert (1824-1887), físico alemão que apresentou importantes contribuições para a Física experimental, além de dar tratamento matemático a numerosos problemas físicos, como, por exemplo, o cálculo da distribuição de correntes elétricas em circuitos elétricos.

A **lei dos nós** aplicada ao nó B fornece: $i_1 + i_2 = i_3$ ①

Observe que essa lei aplicada ao nó E leva à equação ①.

De modo geral, sendo n o número de nós, a lei deve ser aplicada para $(n - 1)$ nós. Para a determinação de i_1, i_2 e i_3 faltam duas equações. Considere, então, a malha $ABEFA$ (**fig. 3**) e sejam V_A, V_B, V_E e V_F os potenciais elétricos dos pontos A, B, E e F, respectivamente. Percorrendo a malha no sentido horário (α), por exemplo, vem:

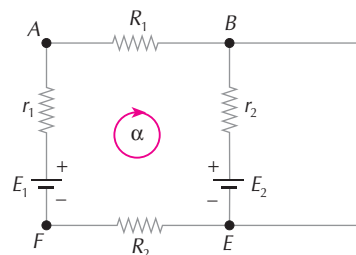



Figura 3.

$$V_A - V_B + V_B - V_E + V_E - V_F + V_F - V_A = 0 \Rightarrow U_{AB} + U_{BE} + U_{EF} + U_{FA} = 0 \quad ②$$

O resultado ② constitui a **segunda lei de Kirchhoff** ou **lei das malhas**:

> Percorrendo-se uma malha num certo sentido, partindo-se e chegando-se ao mesmo ponto, a soma algébrica das ddps é nula.

Para a aplicação da lei das malhas, observe que num resistor a ddp é do tipo $\pm R \cdot i$, valendo o sinal + se o sentido da corrente coincide com o sentido do percurso adotado e o sinal − no caso contrário (**fig. 4**):

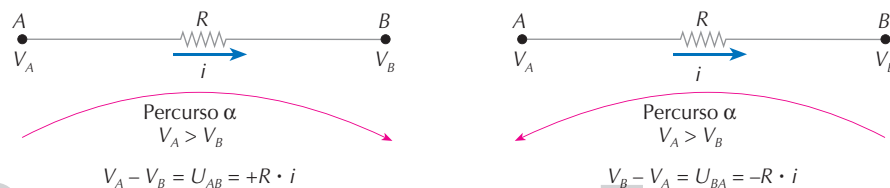



Figura 4.

Para as fem e fcem vale o sinal de entrada no sentido do percurso adotado (**fig. 5**):

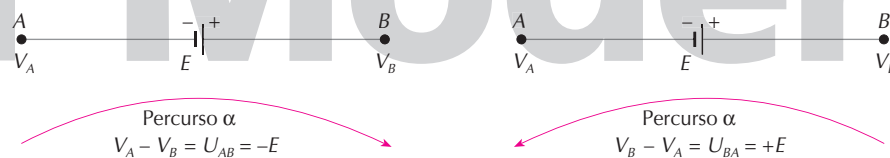



Figura 5.

Assim, na malha $ABEFA$, a partir de A e no sentido do percurso α (**fig. 6**), temos:

$$R_1 \cdot i_1 - r_2 \cdot i_2 + E_2 + R_2 \cdot i_1 - E_1 + r_1 \cdot i_1 = 0 \quad ③$$

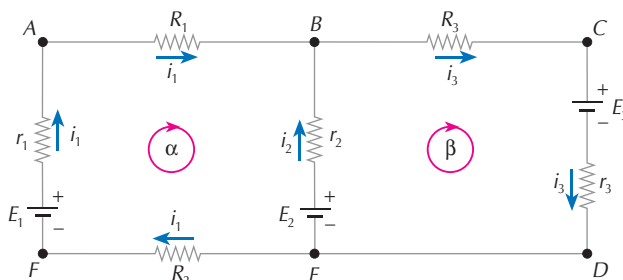



Figura 6.

Na malha $BCDEB$, a partir de C e no sentido do percurso β, temos:

$$E_3 + r_3 \cdot i_3 - E_2 + r_2 \cdot i_2 + R_3 \cdot i_3 = 0 \quad ④$$

Das expressões ①, ③ e ④, podemos determinar as intensidades das correntes elétricas i_1, i_2 e i_3 em todos os ramos do circuito.

Entre na rede No endereço eletrônico http://www.vestibulandoweb.com.br/simulajava/java/kirch2/index.html (acesso em agosto/2009), você encontra aplicações das leis de Kirchhoff.

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

R. 107 O esquema representa uma rede de distribuição de energia elétrica que consta de:

- geradores G_1 e G_2 de fem $E_1 = E_2 = 20$ V e resistências internas $r_1 = r_2 = 0,5\ \Omega$
- motor M de fcem $E_3 = 6$ V e resistência interna $r_3 = 1\ \Omega$
- resistores de resistências $R_1 = R_2 = 0,5\ \Omega$, $R_3 = 3\ \Omega$ e $R_4 = 1\ \Omega$

Determine as intensidades das correntes elétricas em cada ramo do circuito.

Solução:

Inicialmente atribuímos a cada ramo do circuito um sentido de corrente.

- Primeira lei de Kirchhoff ou lei dos nós

Nó B: $i_1 + i_2 = i_3$ ①

- Segunda lei de Kirchhoff ou lei das malhas

Malha ABEFA (a partir de A e no sentido α):

$0,5i_1 - 0,5i_2 + 20 - 0,5i_2 + 1i_1 - 20 + 0,5i_1 = 0$

$2i_1 - i_2 = 0$ ②

Malha BCDEB (a partir de B e no sentido β):

$3i_3 + 6 + 1i_3 + 0,5i_2 - 20 + 0,5i_2 = 0$

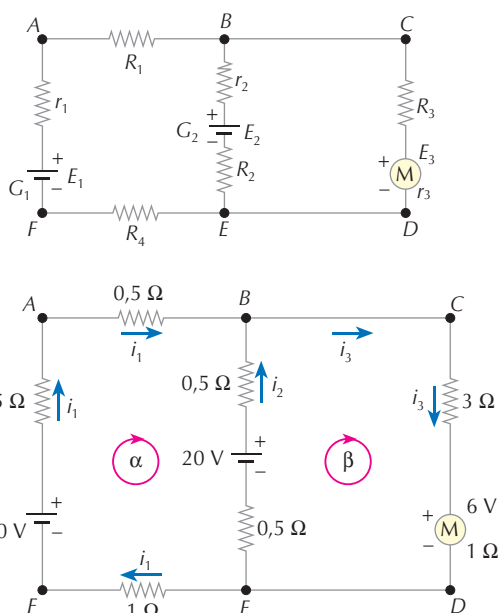
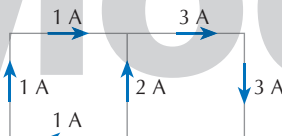
$4i_3 + i_2 - 14 = 0$ ③

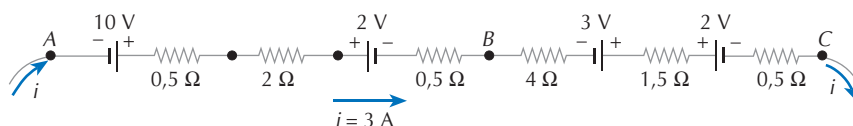
Das expressões ①, ② e ③, obtivemos o sistema:

$$\begin{cases} i_1 + i_2 = i_3 \\ 2i_1 - i_2 = 0 \\ 4i_3 + i_2 - 14 = 0 \end{cases}$$

A resolução desse sistema nos fornece: $\boxed{i_1 = 1\text{ A}}$; $\boxed{i_2 = 2\text{ A}}$ e $\boxed{i_3 = 3\text{ A}}$

Se o valor de uma corrente elétrica resultar negativo, significa que o sentido adotado não é o correto.

Resposta:

R. 108 Para o trecho de circuito da figura calcule a ddp:

a) entre os pontos A e B ($V_A - V_B$); **b)** entre os pontos C e B ($V_C - V_B$).

Solução:

a) Para o cálculo da ddp entre dois pontos, A e B, de um trecho de circuito, escolhemos um sentido α de percurso e efetuamos a soma algébrica das ddps de todos os elementos do trecho. Adotando α no sentido de A para B, calculamos $V_A - V_B$. Lembre-se, ainda, de que para as fems e fcems vale o sinal de entrada no sentido do percurso adotado. Para os resistores a ddp é $\pm R \cdot i$, valendo o sinal + se o sentido de i coincide com o de α e o sinal − no caso contrário.

Assim, temos:

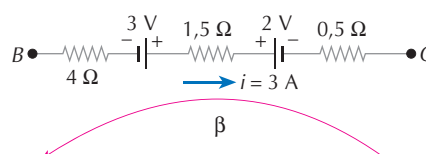
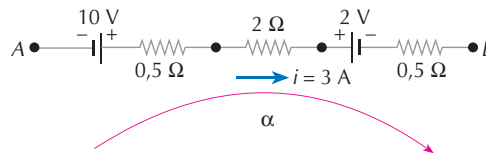
$V_A - V_B = -10 + 0,5 \cdot 3 + 2 \cdot 3 + 2 + 0,5 \cdot 3 \Rightarrow$

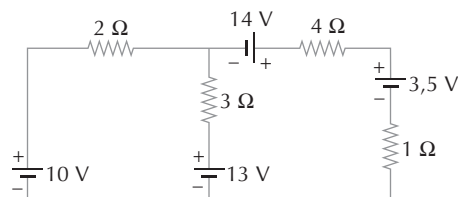
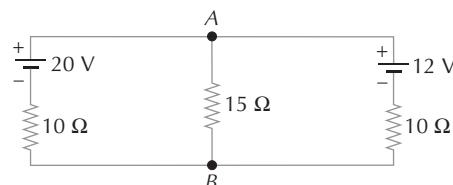
$\Rightarrow \boxed{V_A - V_B = 1\text{ V}}$

b) Adotando-se o sentido de percurso β de C para B, calculamos $V_C - V_B$:

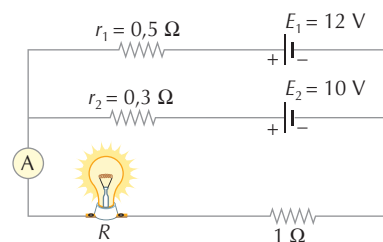
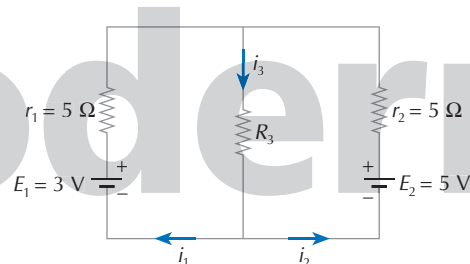
$V_C - V_B = -0,5 \cdot 3 - 2 - 1,5 \cdot 3 + 3 - 4 \cdot 3 \Rightarrow$

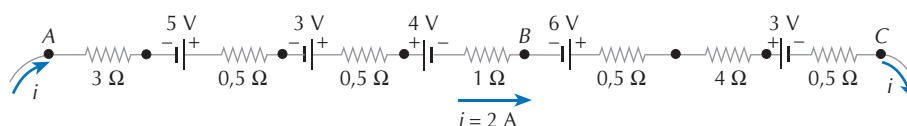
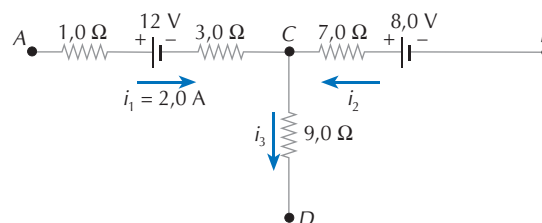
$\Rightarrow \boxed{V_C - V_B = -17\text{ V}}$

Resposta: a) 1 V; b) −17 V

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

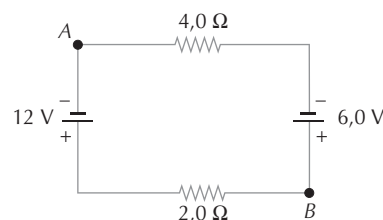
P. 268 Para o circuito da figura, determine as intensidades das correntes elétricas em todos os ramos.

P. 269 No circuito dado, determine a diferença de potencial $V_A - V_B$ no ramo *AB*.

P. 270 (Efei-MG) As duas baterias do circuito, associadas em paralelo, alimentam: o amperímetro A ideal, a lâmpada de incandescência de resistência R e o resistor de resistência 1 Ω, todos em série. Se o amperímetro registra 4 A, calcule:

a) as intensidades de corrente i_1 e i_2 nas baterias;

b) a resistência elétrica R da lâmpada.

P. 271 (FEI-SP) No circuito da figura, a intensidade de corrente i_1 vale 0,2 A. Determine i_2, i_3 e R_3.

P. 272 Para o trecho de circuito dado abaixo, calcule a ddp entre os pontos:

a) A e B ($V_A - V_B$) **b)** C e B ($V_C - V_B$)

P. 273 No trecho de circuito da figura, sabe-se que a ddp entre os pontos A e B é nula. Calcule as intensidades das correntes i_2 e i_3.

P. 274 (UFPE) Calcule o potencial elétrico no ponto A, em volts, considerando que as baterias têm resistências internas desprezíveis e que o potencial no ponto B é igual a 15 volts.

Seção 11.2

Potenciômetro de Poggendorff

Objetivos

- Compreender o funcionamento do potenciômetro de Poggendorff.
- Analisar a condição de equilíbrio para o potenciômetro.

Assim como a ponte de Wheatstone serve para medir resistências elétricas, o **potenciômetro de Poggendorff*** é usado para medir, com precisão, a força eletromotriz de um gerador.

O potenciômetro de Poggendorff é um circuito que obedece ao esquema da **figura 7**, baseando-se na associação em paralelo de geradores de fems diferentes. O uso do potenciômetro como aparelho de precisão deve-se à existência de pilhas padrão, cujas fems são perfeitamente conhecidas. Esse circuito permite comparar a fem E_x de uma pilha desconhecida com a fem E_{pilha} de uma pilha padrão.

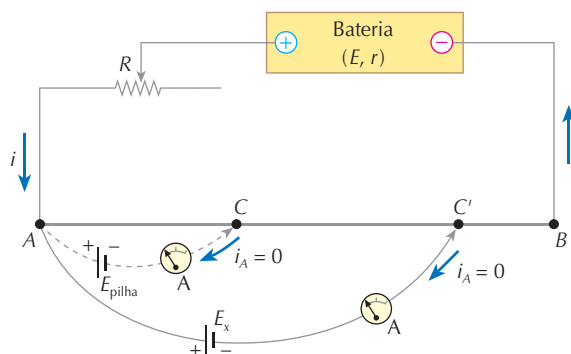



Figura 7. Potenciômetro de Poggendorff.

Entre A e B temos um fio homogêneo de seção transversal constante. Uma bateria de acumuladores de fem E maior do que E_{pilha} e E_x fornece energia ao circuito.

Utilizando-se, de início, a pilha padrão, existe para o cursor uma posição C em que não passa corrente pela pilha:

$$i_A = 0 \quad \text{e} \quad U_{AC} = E_{pilha}$$

Nessas condições, **o potenciômetro é considerado em equilíbrio**. Como R_{AC} é a resistência elétrica do ramo AC e i, a corrente que a bateria mantém no circuito restante, pela lei de Ohm, temos:

$$E_{pilha} = R_{AC} \cdot i \quad ①$$

Trocando-se a pilha padrão pela pilha cuja fem E_x se quer medir, o equilíbrio do potenciômetro se realizará quando o cursor for levado a uma nova posição C' de AB tal que o amperímetro novamente indique zero. Como $R_{AC'}$ é a resistência elétrica do ramo AC' e a bateria mantém a mesma corrente i no circuito restante, temos:

$$E_x = R_{AC'} \cdot i \quad ②$$

Dividindo-se ② por ①, temos:

$$\frac{E_x}{E_{pilha}} = \frac{R_{AC'}}{R_{AC}}$$

* **POGGENDORFF**, Johann Christian (1796-1877), físico alemão que, baseando-se na associação em paralelo de geradores de fems diferentes, idealizou um método preciso para a medição de uma força eletromotriz. Realizou, também, trabalhos em Óptica, como o método para a medição de ângulos pequenos.

Como as resistências dos ramos AC e AC' são diretamente proporcionais aos respectivos comprimentos, escrevemos:

$$\frac{E_x}{E_{pilha}} = \frac{AC'}{AC}$$

Dessa igualdade pode-se determinar, com precisão, o valor da fem E_x.

EXERCÍCIO RESOLVIDO

R. 109 No circuito, o fio AB é homogêneo, de seção transversal constante. A corrente que atravessa o amperímetro A_1 é nula para $\frac{AC}{AB} = \frac{4}{5}$, quando a ddp entre A e B é 2,5 V.

a) Calcule a fcem E'.

b) Se o amperímetro A_2 indica 0,5 A, calcule a fem E.

Solução:

a) Como o fio AB é homogêneo e de seção transversal constante,

$$\frac{R_{AC}}{R_{AB}} = \frac{AC}{AB} \Rightarrow \frac{R_{AC}}{R_{AB}} = \frac{4}{5}$$

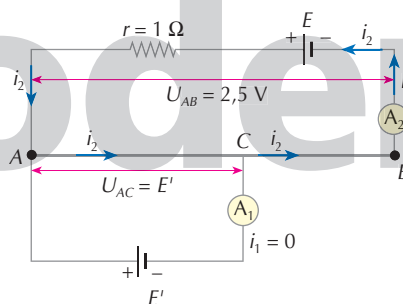
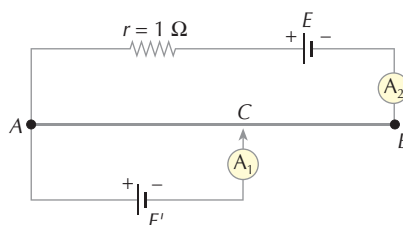
Se A_1 indica zero, tem-se $U_{AC} = E'$, e, pela lei de Ohm:

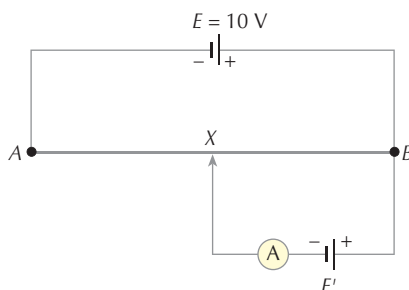
$$\begin{cases} U_{AC} = R_{AC} \cdot i_2 \\ U_{AB} = R_{AB} \cdot i_2 \end{cases} \Rightarrow \frac{U_{AC}}{U_{AB}} = \frac{R_{AC}}{R_{AB}} \Rightarrow \frac{E'}{2,5} = \frac{4}{5} \Rightarrow$$

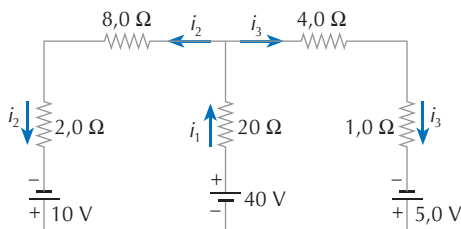
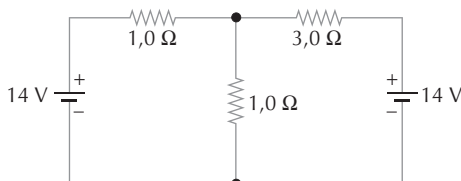
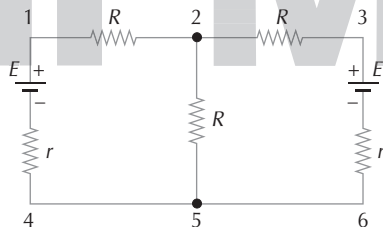
$$\Rightarrow \boxed{E' = 2\text{ V}}$$

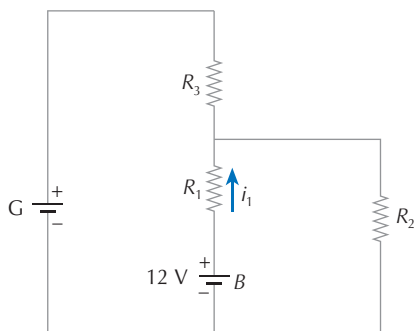
b) Sendo a indicação de A_2 0,5 A, pela equação do gerador, temos:

$$U_{AB} = E - r \cdot i_2 \Rightarrow 2,5 = E - 1 \cdot 0,5 \Rightarrow \boxed{E = 3\text{ V}}$$

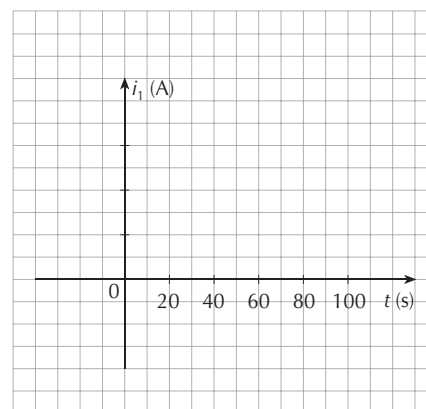
Resposta: a) 2 V; b) 3 V

EXERCÍCIO PROPOSTO

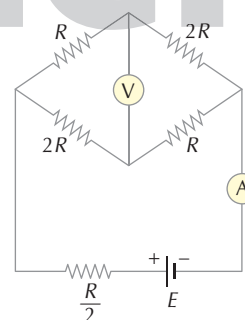
P. 275 No circuito dado, os geradores têm resistências internas desprezíveis e AB é um fio homogêneo de seção transversal constante. Sabe-se que o amperímetro A não indica passagem de corrente numa posição X, tal que $BX = \frac{2 \cdot AB}{5}$. Calcule a fem E'.

EXERCÍCIOS PROPOSTOS DE RECAPITULAÇÃO

P. 276 Considere o circuito abaixo. Determine as intensidades das correntes elétricas i_1, i_2 e i_3.

P. 277 Determine a potência elétrica dissipada no resistor de 3,0 Ω do circuito esquematizado.

P. 278 (EEM-SP) No circuito são dados:
E = força eletromotriz de cada gerador = 12,0 V
r = resistência interna de cada gerador = 1,00 Ω
R = resistência de cada fio condutor = 3,00 Ω

Determine a intensidade e o sentido de corrente elétrica que percorre o trecho 2-5.

P. 279 (Fuvest-SP) No circuito mostrado na figura abaixo, os três resistores têm valores R_1 = 2 Ω, R_2 = 20 Ω e R_3 = 5 Ω. A bateria B tem tensão constante de 12 V. A corrente i_1 é considerada positiva no sentido indicado. Entre os instantes t = 0 s e t = 100 s, o gerador G fornece uma tensão variável V = 0,5t (V em volts e t em segundos).

a) Determine o valor da corrente i_1 para t = 0 s.

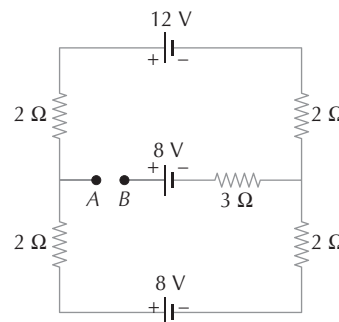
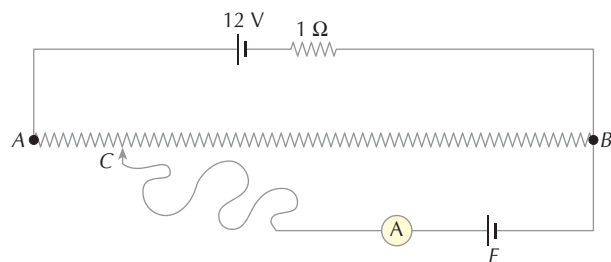
b) Determine o instante t_0 em que a corrente i_1 é nula.

c) Numa folha de papel quadriculado reproduza a figura abaixo. Em seguida, trace a curva que representa a corrente i_1 em função do tempo t, no intervalo de 0 a 100 s. Utilize os eixos da figura indicando claramente a escala da corrente em ampère (A).

d) Determine o valor da potência *Pot* recebida ou fornecida pela bateria B no instante t = 90 s.

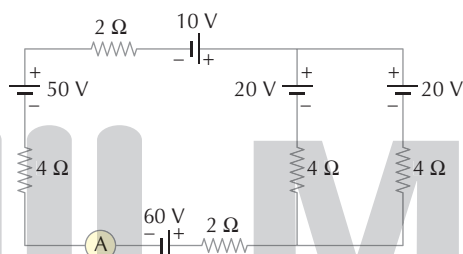
P. 280 (Fuvest-SP) Considere o circuito da figura, em que E = 10 V e R = 1.000 Ω.

a) Qual a leitura do amperímetro A?

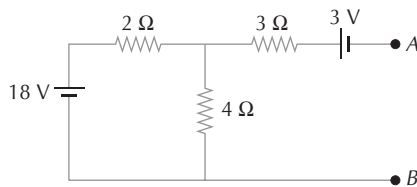
b) Qual a leitura do voltímetro V?

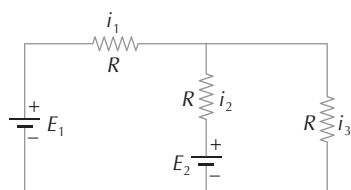
(Considere o amperímetro e o voltímetro ideais.)

P. 281 Determine a diferença de potencial entre os pontos A e B do circuito da figura.

P. 282 (UFRJ) A figura ao lado ilustra o dispositivo usado para medir a força eletromotriz de um gerador. Nele, um gerador de força eletromotriz igual a 12 V e resistência interna igual a 1 Ω é ligado a um fio condutor ôhmico *AB*, de comprimento *L*, seção uniforme, e resistência total R_{AB} = 5 Ω.
O polo negativo do gerador, de força eletromotriz *E* desconhecida, é ligado à extremidade *B* do condutor. Em série com esse gerador há um amperímetro ideal. A extremidade *C* pode ser ligada a qualquer ponto do condutor entre as extremidades *A* e *B*.

Por tentativas, verifica-se que, quando a extremidade *C* é colocada a uma distância de *A* igual a $\frac{1}{4}$ de *AB*, a intensidade da corrente que passa pelo amperímetro torna-se nula. Calcule a força eletromotriz *E*.

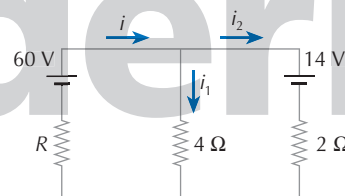
TESTES PROPOSTOS

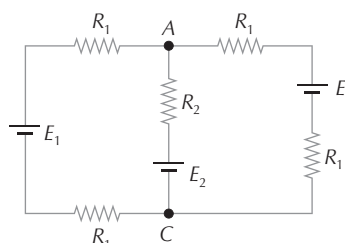
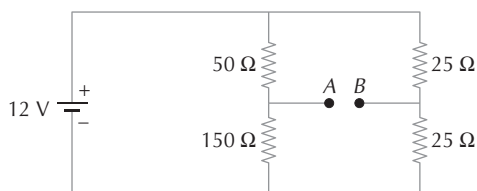
T. 246 (Vunesp) O amperímetro A indicado no circuito é ideal, isto é, tem resistência praticamente nula. Os fios de ligação têm resistência desprezível.

A intensidade da corrente elétrica indicada no amperímetro A é de:
a) i = 1 A
b) i = 2 A
c) i = 3 A
d) i = 4 A
e) i = 5 A

T. 247 (Mackenzie-SP) No trecho de circuito elétrico mostrado abaixo, os geradores de tensão são ideais.

A ddp entre os terminais A e B é:
a) 3 V
b) 5 V
c) 7 V
d) 8 V
e) 9 V

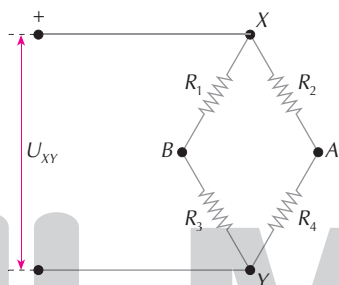
T. 248 (Vunesp) No circuito dado: E_1 = 24 V, E_2 = 12 V e R = 6,0 Ω.

Quais são as correntes i_1, i_2 e i_3 (em módulo)?

	i_1 (A)	i_2 (A)	i_3 (A)
a)	0	2	4
b)	2	0	2
c)	4	2	2
d)	4	2	6
e)	2	2	0

T. 249 (Mackenzie-SP)

No circuito acima, o gerador e o receptor são ideais e as correntes têm os sentidos indicados. Se a intensidade da corrente i_1 é 5 A, então o valor da resistência do resistor *R* é:
a) 8 Ω
b) 5 Ω
c) 4 Ω
d) 6 Ω
e) 3 Ω

T. 250 (UEL-PR) Dados cinco resistores ôhmicos, sendo quatro resistores R_1 = 3,0 Ω e um resistor R_2 = 6,0 Ω e três baterias ideais, sendo E_1 = 6,0 V e E_2 = E_3 = 12 V. Considerando que esses elementos fossem arranjados conforme o circuito da figura a seguir, assinale a alternativa que indica o valor correto para a diferença de potencial entre os pontos A e B [V_{AB} ou (V_A − V_B)]:
a) −3,0 V
b) 3,0 V
c) 10 V
d) 6,0 V
e) −10 V

T. 251 (Vunesp) Um voltímetro, cuja resistência interna é muito grande, é usado para medir a diferença de potencial entre os pontos *A* e *B* do circuito mostrado na figura.

Devemos esperar que a leitura seja:

a) 9 V
b) 0 V
c) 6 V
d) 2 V
e) 3 V

T. 252 (Ufla-MG) No circuito elétrico mostrado abaixo, as resistências R_1, R_2, R_3 e R_4 são iguais.

Dobrando-se o valor da resistência R_4, a tensão U_{AB} entre os pontos *A* e *B*, em módulo e em relação à tensão U_{XY}, será de:

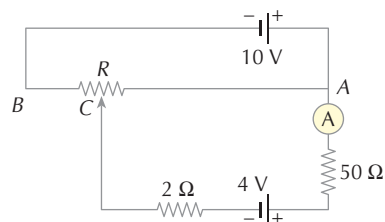
a) $\frac{1}{2} \cdot U_{XY}$

b) $\frac{1}{3} \cdot U_{XY}$

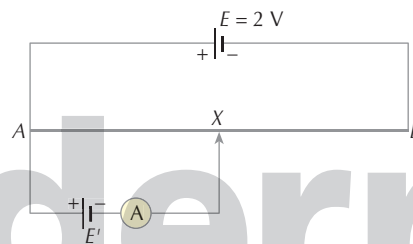
c) $\frac{1}{6} \cdot U_{XY}$

d) $\frac{1}{4} \cdot U_{XY}$

e) U_{XY}

T. 253 (ITA-SP) No circuito dado, quando o cursor é colocado no ponto *C*, o amperímetro A não acusa passagem de corrente.

Qual a diferença de potencial entre os pontos *C* e *B*?

a) 4 V
b) 6 V
c) 10 V
d) 16 V
e) nenhum dos valores anteriores

T. 254 No circuito da figura, quando a ligação do cursor móvel se faz no ponto *X*, tal que *AX* = 80 cm, o amperímetro A não acusa passagem de corrente. O fio *AB* é homogêneo de seção transversal constante e tem 100 cm de comprimento. As resistências dos geradores e dos fios de ligação são desprezíveis.

Considere as seguintes afirmações:

I. As diversas partes do circuito, nas condições dadas, não são percorridas por corrente elétrica.
II. A fem *E'* é igual à fem *E*.
III. A fem *E'* vale 1,6 V.

a) Só a I é correta.
b) Só a II é correta.
c) Só a III é correta.
d) Há, pelo menos, duas corretas.
e) Nenhuma das anteriores.

UNIDADE B

Capítulo 12

Capacitores

Os capacitores são componentes elétricos com inúmeras funções num circuito. São usados, por exemplo, em *flashes* de máquinas fotográficas.

Dependendo da intensidade da chuva, os limpadores de para-brisa são acionados com velocidades diferentes ou até mesmo com intervalos de parada. Esse temporizador é ativado por meio do processo de carga e descarga de um capacitor.

O desfibrilador aplica descargas elétricas provenientes de um capacitor no músculo cardíaco, restabelecendo seu ritmo normal.

Seção 12.1

Capacitor

Objetivos

- Compreender o funcionamento dos capacitores.
- Conceituar capacitância.
- Analisar o capacitor plano.
- Conhecer o campo elétrico que se estabelece entre as placas de um capacitor plano.

Termos e conceitos

- condensador
- armaduras do capacitor
- permitividade absoluta

Considere um condutor *A* neutro e isolado. Vamos eletrizá-lo de modo que seu potencial elétrico seja *V* (**fig. 1**). Sendo *C* sua capacitância eletrostática, a carga elétrica adquirida pelo condutor *A* será:

$$Q = CV$$

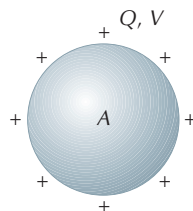



Figura 1. Sob potencial *V*, a carga do condutor *A* é $Q = CV$.

Nessas condições, o condutor *A* apresenta pequena capacitância eletrostática, armazenando pequena carga elétrica.

Entretanto, é possível ao condutor *A* armazenar uma carga maior do que *Q*, com o mesmo potencial *V*. Para isso, aproximemos de *A* um condutor *B*, neutro (**fig. 2**): ocorrerá o fenômeno da indução eletrostática (reveja o capítulo 1). As cargas induzidas Q_1 (negativas) e Q_2 (positivas) alteram o potencial de *A*: as cargas negativas Q_1 produzem, nos pontos de *A*, potencial negativo, e as cargas positivas Q_2, potencial positivo. Devido à carga Q_1, o potencial em *A*, em valor absoluto, é maior que o devido à carga Q_2, pois Q_1 está mais próxima de *A*.

Nessas condições, o potencial de *A* passa a ser $V' < V$.

Para que o condutor *A* adquira novamente o potencial elétrico *V*, uma carga elétrica adicional *q* deve ser-lhe oferecida. Assim, a carga elétrica de *A* passa a ser $Q + q$ e seu potencial elétrico, *V* (**fig. 3**).

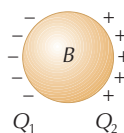
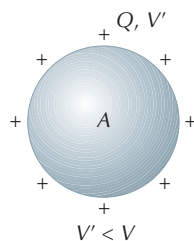



Figura 2. Q_1 reduz o potencial de *A* e Q_2 aumenta. Como a redução é maior que o aumento, resulta $V' < V$.

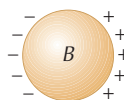
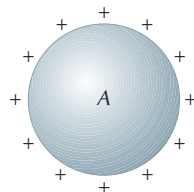



Figura 3. Na presença do condutor *B*, a carga do condutor *A* é $Q + q$ sob potencial *V*.

Concluímos que, na presença de *B*, o condutor *A* pode armazenar mais cargas elétricas com o mesmo potencial.

É possível conseguir um maior armazenamento de cargas reduzindo-se o potencial *V'* a um mínimo. Para isso, deve-se:

1º) **Ligar o condutor *B* à Terra**: desaparece do condutor *B* a carga induzida positiva que aumentava o potencial do condutor *A*.

2º) **Impor que a carga induzida negativa seja a máxima em valor absoluto, pois ela é responsável pela diminuição do potencial de *A*.**

A carga induzida negativa tem valor absoluto no máximo igual à carga indutora. Quando isso ocorre, temos a chamada **indução total**. A indução total é obtida, por exemplo, quando o induzido envolve completamente o indutor (**fig. 4**).

Todo par de condutores *A* e *B*, nessas condições, recebe o nome de **capacitor** ou **condensador**.

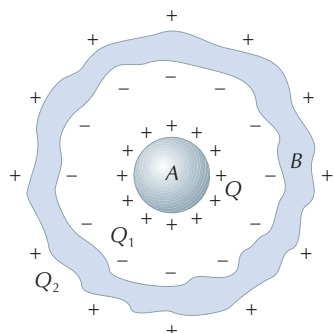



Figura 4. Quando o condutor *B* envolve completamente o condutor *A*, a indução é total. Nesse caso: $|Q_1| = |Q_2| = |Q|$ ou $Q_1 = -Q$ e $Q_2 = Q$. Ligando-se o condutor *B* à Terra, a carga Q_2 escoa.

Na **figura 5** apresentamos um modo de carregar um capacitor por meio de um gerador elétrico *G*.

Figura 5. O par de condutores *A* e *B* constitui um capacitor. O condutor *A* é a armadura positiva e *B*, a armadura negativa.

A função de um capacitor é, portanto, armazenar cargas elétricas.

Os condutores *A* e *B* chamam-se **armaduras do capacitor**. *A* é a armadura positiva e *B* é a armadura negativa.

As armaduras são separadas uma da outra por um isolante. Dependendo da natureza do isolante, teremos capacitores de papel, mica, óleo etc.

Um capacitor é representado pelo símbolo da **figura 6**. A armadura *A* recebe a carga $+Q$; esta induz totalmente na armadura *B* a carga $-Q$.

A carga induzida *Q* escoa, pois *B* está ligado à Terra ou a outro condutor que produz o mesmo efeito. Por exemplo, *B* pode ser ligado diretamente ao terminal negativo do gerador (**fig. 7**).

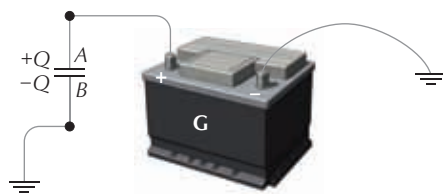



Figura 6. Símbolo do capacitor: dois traços paralelos de mesmo comprimento.

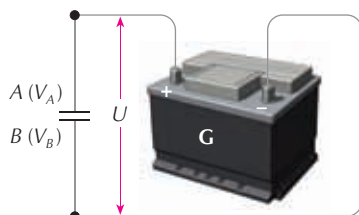



Figura 7. O gerador *G* aplica uma ddp $U = V_A - V_B$ entre as armaduras do capacitor, carregando-o.

Denomina-se **carga** de um capacitor a carga Q de sua armadura positiva. A ddp de um capacitor é a ddp entre suas armaduras positiva e negativa:

$$U = V_A - V_B$$

em que V_A e V_B são os potenciais elétricos das armaduras A e B, respectivamente.

Alterando-se a ddp U aplicada a um capacitor, a carga elétrica Q que ele armazena se altera na mesma proporção. Isso significa que Q e U são grandezas diretamente proporcionais.

Define-se, então, **capacitância** ou **capacidade eletrostática de um capacitor** como sendo a razão de sua carga Q pela ddp U entre suas armaduras:

$$C = \frac{Q}{U}$$

A capacitância mede a capacidade que um capacitor tem de armazenar cargas elétricas. Exemplificando, considere vários capacitores submetidos à mesma ddp U. A fórmula $C = \frac{Q}{U}$ exprime o fato de que armazena maior carga Q o capacitor que tiver maior valor de C.

Capacitor plano

O capacitor plano é formado de duas armaduras planas, iguais, cada uma de área A, colocadas paralelamente a uma distância d (**fig. 8**).

Entre as armaduras, existe um isolante que, inicialmente, será considerado o vácuo.

Ao ser ligado ao gerador, o capacitor se carrega. Entre suas placas, estabelece-se um campo elétrico uniforme $\vec{E}$.

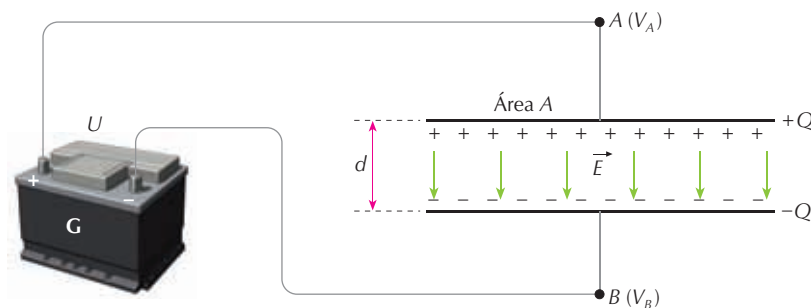



Figura 8. **Capacitor plano.**

A capacitância eletrostática C de um capacitor plano:

- é diretamente proporcional à área A das armaduras;
- é inversamente proporcional à distância d entre elas;
- varia com a natureza do isolante (no caso em estudo, o vácuo).

Assim, temos:

$$C = \varepsilon_0 \cdot \frac{A}{d}$$

A constante de proporcionalidade ε_0 é denominada **permitividade** ou **permissividade absoluta** do vácuo.

No Sistema Internacional de Unidades (SI)*, a permitividade absoluta do vácuo vale:

$$\varepsilon_0 = 8,8 \cdot 10^{-12}\ \text{F/m}$$

De $C = \varepsilon_0 \cdot \frac{A}{d}$ e $C = \frac{Q}{U}$, temos: $\varepsilon_0 \cdot \frac{A}{d} = \frac{Q}{U}$

Sendo uniforme o campo elétrico entre as armaduras do capacitor, podemos escrever: $U = Ed$.

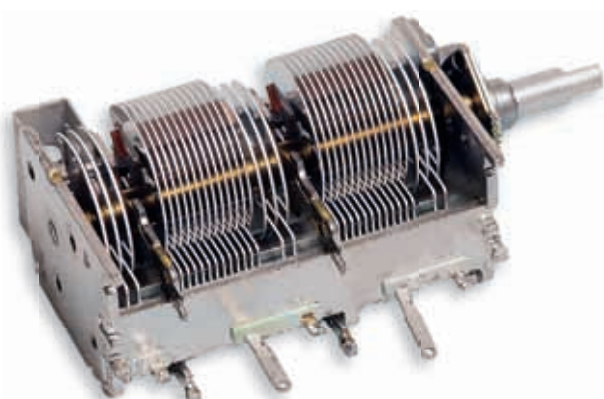
Portanto: $\varepsilon_0 \cdot \frac{A}{d} = \frac{Q}{Ed} \Rightarrow E = \frac{Q}{\varepsilon_0 A}$

Dessa última igualdade, como $\frac{Q}{A} = \sigma$ é a densidade elétrica superficial, obtemos a seguinte fórmula para a intensidade do campo elétrico entre as placas de um capacitor plano:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}$$

Observação

A permitividade absoluta do vácuo (ε_0) e a constante eletrostática do vácuo (k_0) relacionam-se pela fórmula: $k_0 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}$

Tipos usuais de capacitores: os três da parte superior são capacitores eletrolíticos; os três da parte inferior são, respectivamente, da esquerda para a direita, de poliéster, cerâmico e de multicamada.

No capacitor variável da foto, um conjunto de armaduras ligadas entre si é fixo e o outro é móvel. A capacitância varia conforme a área das armaduras que se defrontam. Pode ser utilizado para sintonizar estações de rádio.

Entre na rede No endereço eletrônico http:// www.micro.magnet.fsu.edu/electromag/java/varcapacitor/index.html (acesso em agosto/2009), você pode simular a variação da capacitância de um capacitor.

* De $C = \varepsilon_0 \cdot \frac{A}{d}$, resulta $\varepsilon_0 = C \cdot \frac{d}{A}$. Portanto, no Sistema Internacional de Unidades, ε_0 é expresso em farad/metro (símbolo F/m).

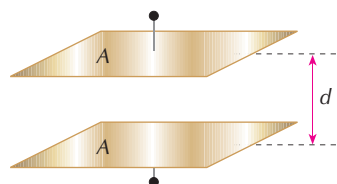
EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

R. 110 As armaduras de um capacitor plano a vácuo apresentam área $A = 0{,}20\ m^2$ e estão situadas a uma distância $d = 2{,}0$ cm. Esse capacitor é carregado sob ddp $U = 1.000$ V.
Determine:
a) a capacitância do capacitor;
b) a carga elétrica do capacitor.
(É dada a permitividade absoluta do vácuo: $\varepsilon_0 = 8{,}8 \cdot 10^{-12}$ F/m)

Solução:
a) A capacitância de um capacitor plano é dada por:

$$C = \varepsilon_0 \cdot \frac{A}{d}$$

Sendo $\varepsilon_0 = 8{,}8 \cdot 10^{-12}$ F/m, $A = 0{,}20\ m^2$ e $d = 2{,}0\ cm = 2{,}0 \cdot 10^{-2}$ m, temos:

$$C = 8{,}8 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{0{,}20}{2{,}0 \cdot 10^{-2}} \Rightarrow \boxed{C = 8{,}8 \cdot 10^{-11}\ F}$$

b) A capacitância de um capacitor é, por definição, $C = \frac{Q}{U}$. Portanto, $Q = CU$.

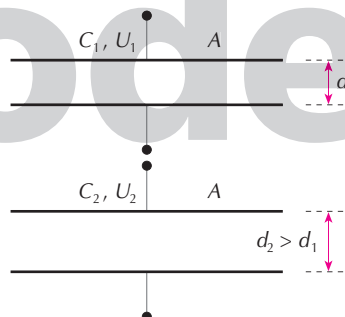
Sendo $C = 8{,}8 \cdot 10^{-11}$ F e $U = 10^3$ V, temos: $Q = 8{,}8 \cdot 10^{-11} \cdot 10^3 \Rightarrow \boxed{Q = 8{,}8 \cdot 10^{-8}\ C}$

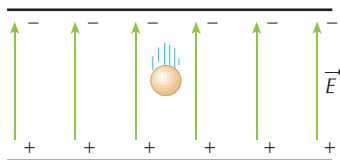
Resposta: a) $8{,}8 \cdot 10^{-11}$ F; b) $8{,}8 \cdot 10^{-8}$ C

R. 111 Um capacitor é constituído por duas placas planas e paralelas, cuja capacitância pode ser modificada variando a distância entre as placas. Com capacitância de $5 \cdot 10^{-10}$ F, foi carregado o capacitor a 50 V e, a seguir, desligado do gerador. Em seguida, afastam-se as placas até a capacitância cair a 10^{-10} F. Calcule a nova ddp entre as placas.

Solução:
Inicialmente, temos $C_1 = 5 \cdot 10^{-10}$ F e $U_1 = 50$ V.
Afastando-se as placas, a capacitância passa a $C_2 = 10^{-10}$ F e a ddp U_2.
Como a carga do capacitor permanece a mesma, pois foi desligado do gerador, obtemos:

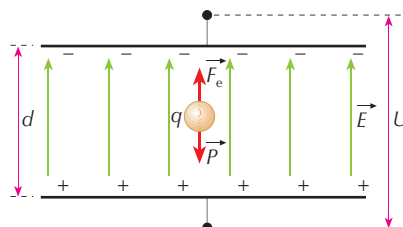
$Q = C_1U_1 = C_2U_2 \Rightarrow 5 \cdot 10^{-10} \cdot 50 = 10^{-10} \cdot U_2 \Rightarrow$

$\Rightarrow \boxed{U_2 = 250\ V}$

Resposta: 250 V

R. 112 Entre as armaduras horizontais de um capacitor plano, é aplicada uma ddp de 10^3 V. A distância entre elas é $d = 5$ cm. Uma pequena esfera de massa $m = 10^{-3}$ kg e carga $q > 0$ desconhecida cai entre as armaduras com movimento uniforme. Seja $g = 10\ m/s^2$ a aceleração da gravidade.

a) Determine a intensidade do campo entre as placas.
b) Qual é o valor de q?
c) Dobrando-se a distância entre as armaduras do capacitor, o que ocorre com sua capacitância?

Solução:
a) O campo elétrico entre as armaduras do capacitor plano é uniforme. Assim, temos: $U = Ed$
Sendo $U = 10^3$ V e $d = 5\ cm = 5 \cdot 10^{-2}$ m, vem:

$10^3 = E \cdot 5 \cdot 10^{-2} \Rightarrow \boxed{E = 2 \cdot 10^4\ N/C}$

V3_P1_UN_B_CAP_12a.indd 270 19.09.09 10:20:44

b) Segundo o enunciado, o movimento é retilíneo e uniforme ($\vec{v}$ constante, aceleração nula e resultante nula). Daí temos que a força peso e a força elétrica têm mesma direção, sentidos opostos e mesma intensidade:

$$P = F_e \Rightarrow mg = qE$$

Sendo $m = 10^{-3}$ kg, $g = 10$ m/s² e $E = 2 \cdot 10^4$ N/C, temos:

$$10^{-3} \cdot 10 = q \cdot 2 \cdot 10^4 \Rightarrow \boxed{q = 5 \cdot 10^{-7}\ \text{C}}$$

c) De $C = \varepsilon_0 \cdot \frac{A}{d}$, concluímos que dobrando-se a distância entre as armaduras a capacitância fica reduzida à metade de seu valor inicial.

Resposta: a) $2 \cdot 10^4$ N/C; b) $5 \cdot 10^{-7}$ C; c) Fica reduzida à metade de seu valor inicial.

R. 113 Um capacitor plano de capacitância 10^{-8} F é ligado aos terminais de uma bateria de 18 V.

a) Qual é a carga elétrica que o capacitor armazena?

b) Da superfície da placa positiva parte uma carga elétrica de 0,5 μC e massa 0,2 g, inicialmente em repouso. Qual é a velocidade da carga ao alcançar a outra placa? (Desprezam-se as ações gravitacionais.)

Solução:

a) De $C = \frac{Q}{U}$, vem: $Q = CU$

Sendo $C = 10^{-8}$ F e $U = 18$ V, resulta: $Q = 10^{-8} \cdot 18 \Rightarrow \boxed{Q = 1{,}8 \cdot 10^{-7}\ \text{C}}$

b) Apliquemos o teorema da energia cinética:

$$\mathcal{T}_{AB} = E_{c(B)} - E_{c(A)}$$

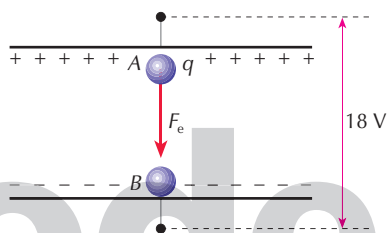
Como $\mathcal{T}_{AB} = q(V_A - V_B)$, temos:

$$q(V_A - V_B) = E_{c(B)} - E_{c(A)}$$

Sendo $E_{c(A)} = 0$, pois q parte do repouso e

$E_{c(B)} = \frac{mv_B^2}{2}$, decorre:

$$0{,}5 \cdot 10^{-6} \cdot 18 = \frac{0{,}2 \cdot 10^{-3} \cdot v_B^2}{2} \Rightarrow \boxed{v_B = 0{,}3\ \text{m/s}}$$

Resposta: a) $1{,}8 \cdot 10^{-7}$ C; b) 0,3 m/s

R. 114 Uma pequena esfera de peso $P = 10^{-3}$ N e carga $q = 10^{-9}$ C está suspensa por um fio isolante entre as armaduras, supostas verticais e distanciadas de 10 cm de um capacitor plano a vácuo carregado. Sabendo-se que na posição de equilíbrio o fio forma com a vertical um ângulo θ, tal que tg θ = 0,5, determine:

a) a intensidade do campo elétrico entre as placas;

b) a ddp entre as armaduras;

c) a densidade elétrica superficial, em valor absoluto, de cada placa, sabendo-se que a permitividade absoluta do vácuo é $\varepsilon_0 = 8{,}8 \cdot 10^{-12}$ unidades SI.

Solução:

a) Na figura, estão representadas as forças que atuam na pequena esfera:

$\vec{T}$ = tração do fio

$\vec{P}$ = peso

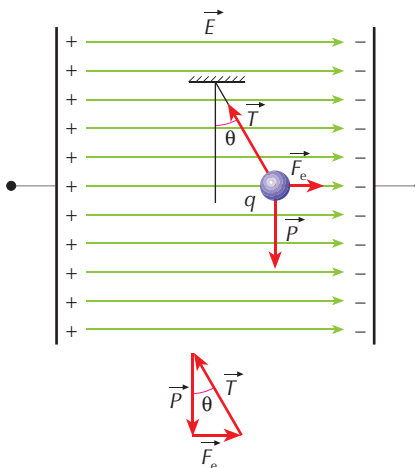
$\vec{F}_e$ = força elétrica (tem mesmo sentido do campo, pois $q > 0$)

Como a partícula está em equilíbrio, a linha poligonal das forças deve ser fechada (resultante nula).

Do triângulo formado pelas forças, temos:

$$\text{tg}\ \theta = \frac{F_e}{P}$$

Sendo tg θ = 0,5, $P = 10^{-3}$ N e $F_e = qE$, com $q = 10^{-9}$ C e E a intensidade do campo elétrico, temos:

$$0{,}5 = \frac{10^{-9} \cdot E}{10^{-3}} \Rightarrow \boxed{E = 5 \cdot 10^5\ \text{N/C}}$$

b) De $U = Ed$, sendo $d = 10$ cm $= 0{,}1$ m, temos:

$$U = 5 \cdot 10^5 \cdot 0{,}1 \Rightarrow \boxed{U = 5 \cdot 10^4 \text{ V}}$$

c) Sendo $E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}$ a intensidade do campo elétrico entre as placas, temos:

$$5 \cdot 10^5 = \frac{\sigma}{8{,}8 \cdot 10^{-12}} \Rightarrow \boxed{\sigma = 4{,}4 \cdot 10^{-6} \text{ C/m}^2}$$

Resposta: a) $5 \cdot 10^5$ N/C; b) $5 \cdot 10^4$ V; c) $4{,}4 \cdot 10^{-6}$ C/m^2

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

P. 283 As armaduras de um capacitor plano, a vácuo, medem 30 cm · 50 cm e estão separadas por uma distância $d = 2$ mm. Calcule:

a) a capacitância desse capacitor;

b) a carga que ele receberá quando entre suas armaduras for aplicada uma ddp igual a 2.000 V.

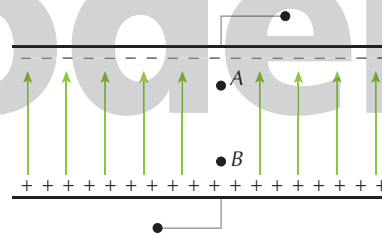
(Adote $\varepsilon_0 = 8{,}8 \cdot 10^{-12}$ F/m.)

P. 284 Ligam-se, no vácuo, duas placas paralelas de alumínio a uma bateria de $U_1 = 12$ V. Após desligá-las da fonte, a distância entre elas é duplicada. Determine a nova ddp U_2 entre as placas.

P. 285 As placas de três capacitores planos a vácuo possuem áreas A, 2A e $\frac{A}{2}$, sendo, respectivamente, d, $\frac{d}{2}$ e $2d$ as distâncias entre as placas. O primeiro capacitor possui capacitância $C = 1{,}0$ μF. Quais são as capacitâncias dos outros dois?

P. 286 Entre as armaduras de um capacitor plano, distantes entre si 10 cm, aplica-se uma ddp de 10^3 V. Sejam A e B dois pontos entre as armaduras e distantes 5 cm, conforme a figura ao lado.

a) Com que velocidade uma carga $q = 10^{-7}$ C e massa $m = 4 \cdot 10^{-4}$ kg deve ser lançada de A para atingir B com velocidade nula? Despreze as ações gravitacionais.

b) Sendo $Q = 4{,}4 \cdot 10^{-9}$ C a carga elétrica do capacitor e $\varepsilon_0 = 8{,}8 \cdot 10^{-12}$ unidades SI a permitividade absoluta do vácuo, calcule a capacitância do capacitor e a área de suas placas.

P. 287 Num capacitor plano a vácuo, a distância entre suas armaduras supostas horizontais (**fig. A**) é $d = 5{,}0$ cm e a ddp é $U = 1{,}0 \cdot 10^3$ V. Uma pequena esfera de massa $m = 1{,}0$ g e carga 2,0 μC encontra-se suspensa entre as armaduras por meio de um fio isolante e inextensível. Adote aceleração da gravidade $g = 10{,}0$ m/s^2.

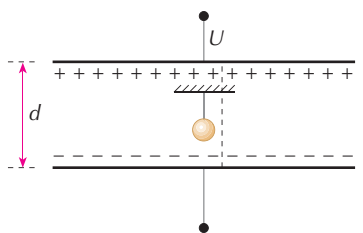



Figura A.

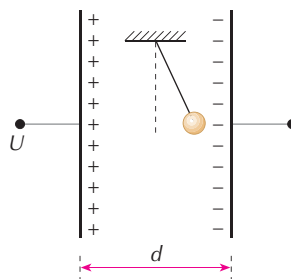



Figura B.

Determine:

a) a força de tração exercida pela esfera no fio de sustentação;

b) a nova força de tração se as armaduras fossem verticais, conforme a **figura B**;

c) a densidade elétrica superficial, em módulo, de cada armadura, sabendo-se que a permitividade absoluta do vácuo é $\varepsilon_0 = 8{,}8 \cdot 10^{-12}$ unidades SI.

A experiência de Millikan

Entre 1909 e 1916, o físico norte-americano ROBERT MILLIKAN (1868-1952) conseguiu medir a carga do elétron. Os aparelhos utilizados estão ilustrados na **figura A**. Um capacitor plano a ar, com armaduras horizontais, é ligado a uma fonte de ddp variável e conhecida. Gotas de óleo muito pequenas, produzidas por um atomizador *A*, são lançadas na região acima da armadura superior. Nesta, existe um pequeno orifício *O*, através do qual uma ocasional gota de óleo cairá. Quando entre as armaduras, essa gota é iluminada por um feixe de luz e observada com auxílio de um microscópio (**fig. B**). Estando a chave Ch aberta, o capacitor está neutro e, nessas condições, a gota de óleo cai sob ação das forças:

- peso $\vec{P}$, cuja intensidade é $P = mg = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho g$, em que R é o raio da gota, ρ a densidade do óleo e g a aceleração da gravidade;
- empuxo $\vec{F}_1$, cuja intensidade é $F_1 = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho' g$, em que ρ' é a densidade do ar;
- $\vec{F}_2$ de resistência viscosa do ar, cuja intensidade é dada pela lei de Stokes: $F_2 = 6\pi\eta R v$, em que η é a viscosidade do ar e v, a velocidade da gota (**fig. C**).

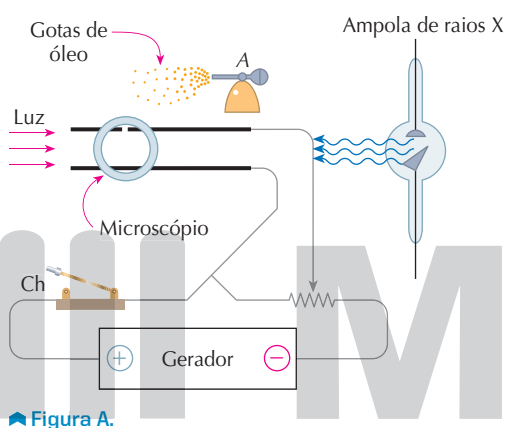
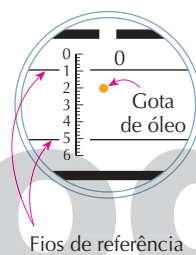
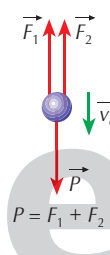
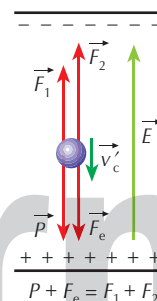



Figura A. Figura B. Figura C. Figura D.

Quando a resultante dessas forças é nula, a gota adquire velocidade constante v_c. Essa velocidade é obtida utilizando-se um cronômetro e medindo-se o intervalo de tempo gasto pela gota para cair entre dois fios de referência na ocular do microscópio. Nessas condições, determinada a velocidade v_c, podemos calcular o raio R da gota, utilizando:

$$P = F_1 + F_2\text{, isto é: } \frac{4}{3}\pi R^3 \rho g = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho' g + 6\pi\eta R v_c$$

Mediante uma ampola de raios X, ioniza-se o ar entre as armaduras do capacitor. O ar ionizado contém elétrons que se agregam às gotas de óleo. Fechando-se a chave Ch, aplica-se a ddp U entre as armaduras, originando um campo elétrico uniforme de intensidade $E = \frac{U}{d}$, em que d é a distância entre as armaduras.

Se q é a carga elétrica da gota, o valor de E pode ser ajustado, de modo que a gota caia com nova velocidade constante v'_c sob ação das três forças citadas e mais a força elétrica $\vec{F}_e$ de intensidade $F_e = qE = q\frac{U}{d}$ (**fig. D**).

Nessas condições, de $F_e + P = F_1 + F_2$ resulta: $q\frac{U}{d} + \frac{4}{3}\pi R^3 \rho g = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho' g + 6\pi\eta R v'_c$

A velocidade v'_c é medida de modo análogo a v_c. Medindo-se a ddp U e a distância d entre as armaduras, e conhecidas as densidades do óleo ρ, do ar ρ' e a viscosidade η do ar, calcula-se q.

Repetindo a experiência várias vezes com gotas diferentes, Millikan verificou que o valor da carga q de cada gota era sempre um múltiplo inteiro de um certo valor mínimo. Por exemplo, obteve valores iguais a $4{,}8 \cdot 10^{-19}$ C, $6{,}4 \cdot 10^{-19}$ C, $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C e nunca um valor menor que $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C. Isso significa que as cargas elétricas sempre aparecem em múltiplos de $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C. Millikan tomou esse valor mínimo como sendo a carga de um elétron, em valor absoluto, representou-o pela letra $\boldsymbol{e}$ e o denominou **carga elementar:** $\boldsymbol{e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}}$ **C**

Seção 12.2

Associação de capacitores

Objetivos

- Explicar a associação de capacitores em série.
- Compreender como obter a capacitância equivalente em uma associação em série.
- Explicar a associação de capacitores em paralelo.
- Compreender como obter a capacitância equivalente em uma associação em paralelo.

Os capacitores, analogamente aos resistores e geradores, podem ser associados em **série** e em **paralelo**. Denomina-se **capacitor equivalente da associação** aquele que, eletrizado com a mesma carga que a da associação, suporta entre seus terminais a mesma ddp.

1 Associação de capacitores em série

Na associação em série, a armadura negativa de um capacitor está ligada à armadura positiva do seguinte (**fig. 9**). A carga $+Q$, que é comunicada à associação, é recebida pela armadura positiva do primeiro capacitor. Esta induz $-Q$ na armadura negativa do primeiro capacitor, e a carga induzida $+Q$ escoa para a armadura positiva do segundo capacitor. Esta, por sua vez, induz $-Q$ na armadura negativa do segundo capacitor e $+Q$ na armadura positiva do terceiro capacitor, e assim sucessivamente.

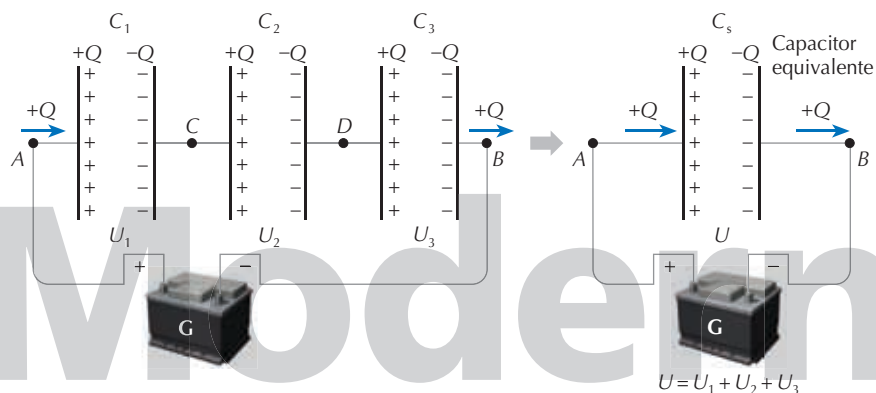



Figura 9. Associação de capacitores em série.

Nessas condições, podemos concluir:

> Na associação em série, todos os capacitores apresentam mesma carga Q.

O primeiro capacitor, de capacitância C_1, está sob ddp $U_1 = V_A - V_C$; o segundo, de capacitância C_2, está sob ddp $U_2 = V_C - V_D$; o terceiro, de capacitância C_3, está sob ddp $U_3 = V_D - V_B$. A associação está sob ddp $U = V_A - V_B$, que é a mesma ddp do capacitor equivalente, cuja capacitância é C_s. Assim, temos:

$$V_A - V_B = V_A - V_C + V_C - V_D + V_D - V_B \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \boxed{U = U_1 + U_2 + U_3}$$

> Na associação em série, a ddp aplicada à associação é a soma das ddps dos capacitores associados.

Assim, a associação em série permite subdividir a ddp, solicitando menos de cada capacitor.

Da definição de capacitância, temos:

$$C_1 = \frac{Q}{U_1} \Rightarrow U_1 = \frac{Q}{C_1}$$

$$C_2 = \frac{Q}{U_2} \Rightarrow U_2 = \frac{Q}{C_2}$$

$$C_3 = \frac{Q}{U_3} \Rightarrow U_3 = \frac{Q}{C_3}$$

$$C_s = \frac{Q}{U} \Rightarrow U = \frac{Q}{C_s}$$

Como $U = U_1 + U_2 + U_3$, resulta: $\frac{Q}{C_s} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} + \frac{Q}{C_3} \Rightarrow \boxed{\frac{1}{C_s} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}}$

Essa fórmula permite determinar a capacitância do capacitor equivalente.

Numa associação em série de n capacitores iguais, sendo C a capacitância de cada um deles, a capacitância do equivalente é:

$$\boxed{C_s = \frac{C}{n}}$$

Para o caso particular de dois capacitores associados em série, a capacitância equivalente (C_s) é dada por:

$$\frac{1}{C_s} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \Rightarrow \frac{1}{C_s} = \frac{C_1 + C_2}{C_1 C_2} \Rightarrow \boxed{C_s = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}}$$

Portanto, no caso da associação de dois capacitores em série, a capacitância equivalente é dada pela razão entre o produto ($C_1 \cdot C_2$) e a soma ($C_1 + C_2$) das capacitâncias dos capacitores.

2 Associação de capacitores em paralelo

Na associação em paralelo, as armaduras positivas estão ligadas entre si, apresentando mesmo potencial V_A, e as armaduras negativas também estão ligadas entre si, possuindo o potencial comum V_B (**fig. 10**).

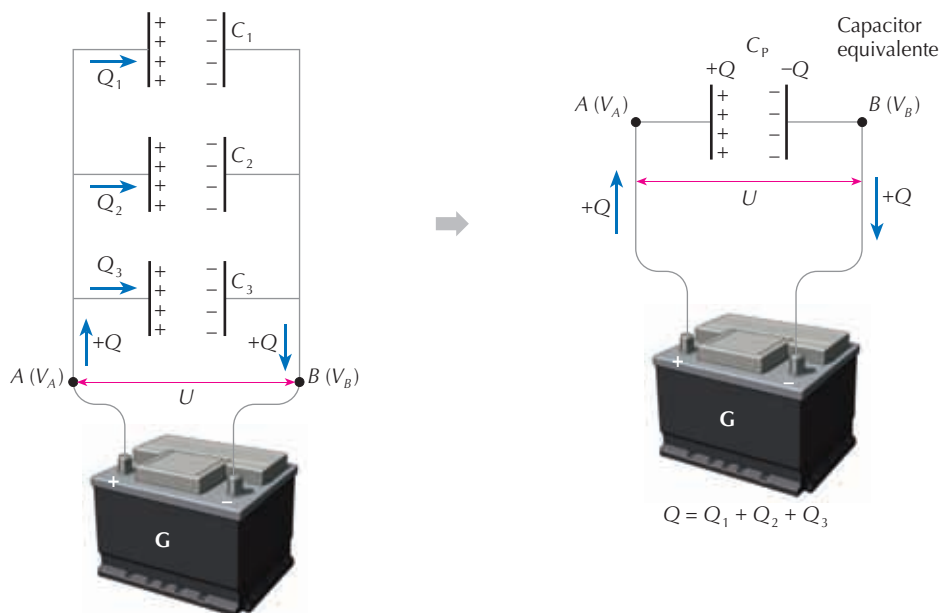



Figura 10. Associação de capacitores em paralelo.

Nessas condições, podemos concluir:

Na associação em paralelo, todos os capacitores apresentam mesma ddp:
$$U = V_A - V_B$$

A carga Q fornecida à associação divide-se em Q_1, Q_2 e Q_3, localizando-se nas armaduras positivas dos capacitores de capacitância C_1, C_2 e C_3, respectivamente. Portanto, vem:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

Como $Q_1 = C_1 \cdot U$; $Q_2 = C_2 \cdot U$; $Q_3 = C_3 \cdot U$ e $Q = C_p \cdot U$, em que C_p é a capacitância do capacitor equivalente da associação, temos:

$$C_p \cdot U = C_1 \cdot U + C_2 \cdot U + C_3 \cdot U \Rightarrow \boxed{C_p = C_1 + C_2 + C_3}$$

Essa fórmula determina a capacitância do capacitor equivalente.

A associação em paralelo permite aumentar a capacitância eletrostática do sistema.

Numa associação em paralelo de n capacitores iguais, sendo C a capacitância de cada um, a capacitância do equivalente é:

$$C_p = nC$$

Seção 12.3

Energia potencial elétrica armazenada por um capacitor

Objetivos

- Analisar a energia potencial elétrica armazenada em um capacitor.
- Relacionar a energia potencial armazenada com a área do gráfico da carga em função da ddp.

Considere o circuito da **figura 11**. Fechando-se a chave Ch, o capacitor se carrega. Sendo sua capacitância $C = \frac{\text{carga}}{\text{ddp}}$, resulta que a carga do capacitor é, em cada instante, diretamente proporcional à sua ddp.

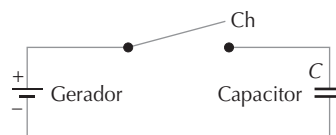



Figura 11. Ao fechar a chave Ch, o capacitor se carrega e armazena energia potencial elétrica.

Na **figura 12** representamos graficamente esse resultado. Nesse gráfico, Q e U representam a carga e a ddp finais do capacitor.

O gerador, ao carregar o capacitor, forneceu-lhe energia potencial elétrica W. Essa energia armazenada pelo capacitor é dada, numericamente, pela área A da **figura 12**.

Assim: $$W = \frac{QU}{2}$$

Sendo $Q = CU$, resulta: $$W = \frac{CU^2}{2}$$

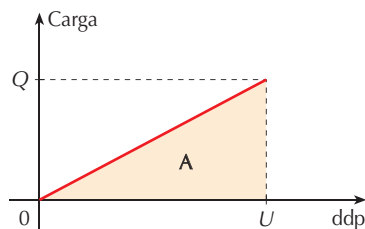



Figura 12. A área *A* é numericamente igual à energia potencial elétrica armazenada pelo capacitor.

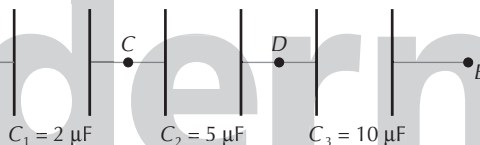
Observação

A energia potencial elétrica de uma associação qualquer de capacitores é a soma das energias potenciais elétricas dos capacitores associados e, ainda, igual à energia potencial elétrica do capacitor equivalente.

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

R. 115 Três capacitores são associados, conforme a figura. Fornecendo-se à associação a carga 10 μC, determine:

a) a carga e a ddp em cada capacitor;
b) a ddp da associação;
c) a capacitância do capacitor equivalente;
d) a energia potencial elétrica da associação.

A — C — D — B; $C_1 = 2\ \mu F$, $C_2 = 5\ \mu F$, $C_3 = 10\ \mu F$

Solução:

a) Os capacitores, estando associados em série, eletrizam-se com a mesma carga $\boxed{Q = 10\ \mu C}$ fornecida à associação.

Sendo $C = \frac{Q}{U}$, temos $U = \frac{Q}{C}$. Assim, para cada capacitor, temos:

$$U_{AC} = \frac{Q}{C_1} = \frac{10}{2} \Rightarrow \boxed{U_{AC} = 5\ V};\ U_{CD} = \frac{Q}{C_2} = \frac{10}{5} \Rightarrow \boxed{U_{CD} = 2\ V};\ U_{DB} = \frac{Q}{C_3} = \frac{10}{10} \Rightarrow \boxed{U_{DB} = 1\ V}$$

b) A ddp da associação é a soma das ddps dos capacitores associados.

$$U_{AB} = U_{AC} + U_{CD} + U_{DB} \Rightarrow U_{AB} = 5 + 2 + 1 \Rightarrow \boxed{U_{AB} = 8\ V}$$

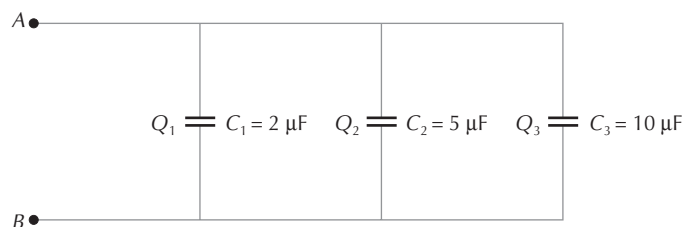
c) A capacitância do capacitor equivalente é:

$$\frac{1}{C_s} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \Rightarrow \frac{1}{C_s} = \frac{1}{2} + \frac{1}{5} + \frac{1}{10} \Rightarrow \frac{1}{C_s} = \frac{5 + 2 + 1}{10} \Rightarrow \frac{1}{C_s} = \frac{8}{10} \Rightarrow \boxed{C_s = \frac{5}{4}\ \mu F}$$

d) A energia potencial elétrica armazenada pela associação é a energia potencial elétrica do capacitor equivalente. Sendo a carga do equivalente a mesma dos capacitores associados ($Q = 10\ \mu C$) e a ddp do equivalente a mesma da associação ($U_{AB} = 8\ V$), temos:

$$W = \frac{QU_{AB}}{2} \Rightarrow W = \frac{10 \cdot 8}{2} \Rightarrow \boxed{W = 40\ \mu J}$$

Resposta: a) $Q = 10\ \mu C$, $U_{AC} = 5\ V$, $U_{CD} = 2\ V$ e $U_{DB} = 1\ V$; b) 8 V; c) $\frac{5}{4}\ \mu F$; d) 40 μJ

R. 116 Três capacitores são associados conforme a figura.

Aplicando-se entre *A* e *B* a ddp de 8 V, determine:

a) a ddp e a carga em cada capacitor;

b) a carga da associação;

c) a capacitância do capacitor equivalente;

d) a energia potencial elétrica da associação.

Solução:

a) Os capacitores, estando associados em paralelo, ficam sob a mesma ddp $\boxed{U_{AB} = 8\text{ V}}$ aplicada associação.

Sendo $C = \frac{Q}{U}$, temos $Q = CU$. Assim, para cada capacitor, temos:

$$Q_1 = C_1U_{AB} = 2 \cdot 8 \Rightarrow \boxed{Q_1 = 16\ \mu C}$$

$$Q_2 = C_2U_{AB} = 5 \cdot 8 \Rightarrow \boxed{Q_2 = 40\ \mu C}$$

$$Q_3 = C_3U_{AB} = 10 \cdot 8 \Rightarrow \boxed{Q_3 = 80\ \mu C}$$

b) A carga da associação é a soma das cargas dos capacitores associados:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 \Rightarrow Q = 16 + 40 + 80 \Rightarrow \boxed{Q = 136\ \mu C}$$

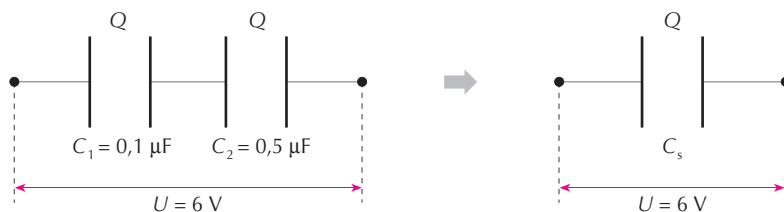
c) Como $C_p = C_1 + C_2 + C_3$, temos: $C_p = 2 + 5 + 10 \Rightarrow \boxed{C_p = 17\ \mu F}$

d) A energia potencial elétrica armazenada pela associação é a energia potencial elétrica do capacitor equivalente. Sendo $Q = 136\ \mu C$ e $U_{AB} = 8$ V, respectivamente, a carga e a ddp do equivalente, temos:

$$W = \frac{QU_{AB}}{2} \Rightarrow W = \frac{136 \cdot 8}{2} \Rightarrow \boxed{W = 544\ \mu J}$$

Resposta: a) $U_{AB} = 8$ V, $Q_1 = 16\ \mu C$, $Q_2 = 40\ \mu C$ e $Q_3 = 80\ \mu C$; b) $136\ \mu C$; c) $17\ \mu F$; d) $544\ \mu J$

R. 117 Um capacitor de 0,1 μF é ligado em série com outro de 0,5 μF. O conjunto é ligado aos terminais de uma bateria de 6 V. Determine a carga e a ddp de cada capacitor.

Solução:

A capacitância C_s do capacitor equivalente vale:

$$\frac{1}{C_s} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \Rightarrow \frac{1}{C_s} = \frac{C_1 + C_2}{C_1C_2} \Rightarrow C_s = \frac{C_1C_2}{C_1 + C_2} \Rightarrow C_s = \frac{0,1 \cdot 0,5}{0,1 + 0,5} \Rightarrow C_s = \frac{1}{12}\ \mu F$$

A carga Q do capacitor equivalente vale: $Q = C_sU \Rightarrow Q = \frac{1}{12} \cdot 6 \Rightarrow \boxed{Q = 0,5\ \mu C}$

Todos os capacitores da associação eletrizam-se com a mesma carga $Q = 0,5\ \mu C$.

Para o primeiro capacitor, temos: $C_1 = \frac{Q}{U_1} \Rightarrow U_1 = \frac{Q}{C_1} \Rightarrow U_1 = \frac{0,5}{0,1} \Rightarrow \boxed{U_1 = 5\text{ V}}$

E, para o segundo: $C_2 = \frac{Q}{U_2} \Rightarrow U_2 = \frac{Q}{C_2} \Rightarrow U_2 = \frac{0,5}{0,5} \Rightarrow \boxed{U_2 = 1\text{ V}}$

Resposta: $Q = 0,5\ \mu C$, $U_1 = 5$ V e $U_2 = 1$ V

V3_P1_UN_B_CAP_12a.indd 278 19.09.09 10:20:50

R. 118 Um capacitor A de capacitância $C_A = 3 \cdot 10^{-6}$ F é carregado sob ddp $U_A = 100$ V. Em seguida, é desligado do gerador e ligado em paralelo a outro capacitor B de capacitância $C_B = 2 \cdot 10^{-6}$ F, descarregado. Determine:

a) as novas cargas após a ligação e a nova ddp entre as armaduras;

b) a diminuição da energia potencial elétrica após a ligação efetuada.

Solução:

a) A carga elétrica do capacitor A, antes de ligá-lo a B, vale:

$Q_A = C_A U_A \Rightarrow Q_A = 3 \cdot 10^{-6} \cdot 100 \Rightarrow Q_A = 3 \cdot 10^{-4}$ C

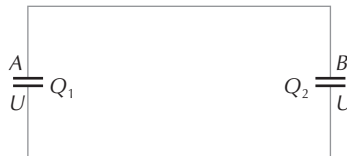
Ligando A e B em paralelo, a carga Q_A se distribui entre os capacitores A (Q_1) e B (Q_2).

A Q_1 U — Q_2 B U

Pelo princípio da conservação das cargas elétricas, temos:

$$Q_A = Q_1 + Q_2$$

Sendo $Q_1 = C_A U$ e $Q_2 = C_B U$, em que U é a ddp comum aos dois capacitores, temos:

$$Q_A = C_A U + C_B U \Rightarrow U = \frac{Q_A}{C_A + C_B} \Rightarrow U = \frac{3 \cdot 10^{-4}}{3 \cdot 10^{-6} + 2 \cdot 10^{-6}} \Rightarrow \boxed{U = 60 \text{ V}}$$

De $Q_1 = C_A U$, temos:

$$Q_1 = 3 \cdot 10^{-6} \cdot 60 \Rightarrow \boxed{Q_1 = 1{,}8 \cdot 10^{-4} \text{ C}} \quad \text{e} \quad Q_2 = C_B U = 2 \cdot 10^{-6} \cdot 60 \Rightarrow \boxed{Q_2 = 1{,}2 \cdot 10^{-4} \text{ C}}$$

b) A energia potencial elétrica inicial do sistema de capacitores é a própria energia potencial elétrica inicial de A, pois B estava inicialmente neutro.

$$\text{De } W_{inicial} = \frac{Q_A \cdot U_A}{2}, \text{ temos: } W_{inicial} = \frac{3 \cdot 10^{-4} \cdot 100}{2} \Rightarrow W_{inicial} = 1{,}5 \cdot 10^{-2} \text{ J}$$

A energia potencial elétrica final do sistema de capacitores é a energia do equivalente:

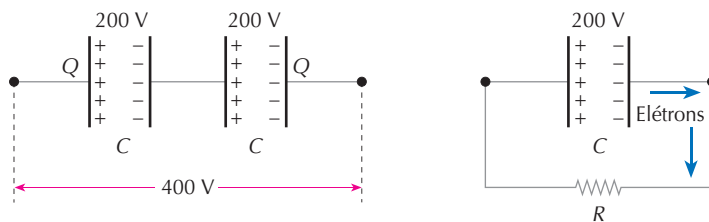
$$W_{final} = \frac{Q_A U}{2} \Rightarrow W_{final} = \frac{3 \cdot 10^{-4} \cdot 60}{2} \Rightarrow W_{final} = 0{,}9 \cdot 10^{-2} \text{ J}$$

A diminuição da energia potencial elétrica é dada pela diferença entre a energia potencial elétrica inicial e a final, logo:

$$W_{inicial} - W_{final} = 1{,}5 \cdot 10^{-2} - 0{,}9 \cdot 10^{-2} \Rightarrow \boxed{W_{inicial} - W_{final} = 0{,}6 \cdot 10^{-2} \text{ J}}$$

A diminuição da energia deve-se ao efeito Joule durante a redistribuição de cargas e à emissão de energia sob forma de onda eletromagnética (assunto que veremos no capítulo 17).

Resposta: a) $Q_1 = 1{,}8 \cdot 10^{-4}$ C, $Q_2 = 1{,}2 \cdot 10^{-4}$ C e $U = 60$ V; b) $0{,}6 \cdot 10^{-2}$ J

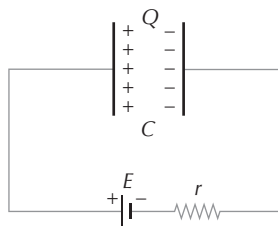
R. 119 Dois capacitores iguais são ligados em série e, aos extremos da associação, aplica-se a ddp de 400 V. A seguir, descarrega-se um deles, por meio de um resistor, e verifica-se que o calor desenvolvido foi de 0,5 J. Calcule a capacitância de cada capacitor.

Solução:

Como os capacitores são iguais, cada um fica submetido a 200 V. Ligar um deles aos terminais do resistor corresponde a ligar diretamente a placa negativa com a positiva. Então, o capacitor se descarrega e sua energia é transformada em calor no resistor.

Sendo $W = \frac{CU^2}{2}$ a energia potencial elétrica que o capacitor armazenava, e como $W = 0{,}5$ J e $U = 200$ V, temos:

$$0{,}5 = \frac{C \cdot 200^2}{2} \Rightarrow C = 2{,}5 \cdot 10^{-5} \text{ F} \Rightarrow \boxed{C = 25 \ \mu\text{F}}$$

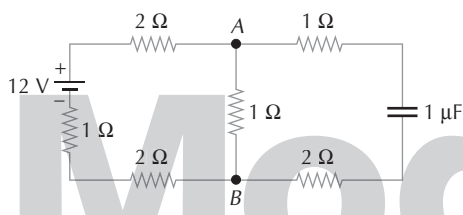
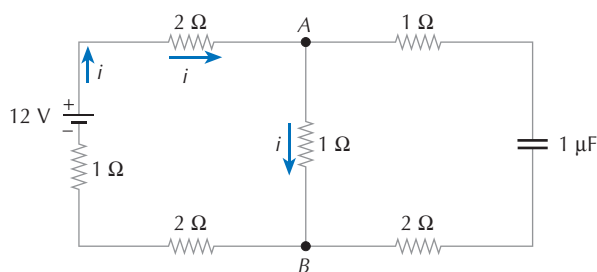
Resposta: 25 μF

R. 120 Um capacitor de capacitância $C = 2 \cdot 10^{-6}$ F é ligado aos terminais de uma pilha de fem 3 V e resistência interna $r = 0{,}1\ \Omega$. Calcule a carga e a energia potencial elétrica do capacitor.

Solução:
O capacitor carrega-se durante certo intervalo de tempo, após o qual cessa a movimentação de cargas no circuito ($i = 0$).
Assim, **num capacitor, não passa corrente contínua**.
Nessas condições, a ddp nos terminais da pilha é a sua fem ($U = E - ri$, com $i = 0$).
Portanto, a ddp nos terminais do capacitor é $U = 3$ V.

De $Q = CU$, temos: $Q = 2 \cdot 10^{-6} \cdot 3 \Rightarrow \boxed{Q = 6 \cdot 10^{-6}\ \text{C}}$

Como $W = \dfrac{QU}{2}$, temos: $W = \dfrac{6 \cdot 10^{-6} \cdot 3}{2} \Rightarrow \boxed{W = 9 \cdot 10^{-6}\ \text{J}}$

Resposta: $6 \cdot 10^{-6}$ C; $9 \cdot 10^{-6}$ J

R. 121 Para o circuito esquematizado, determine a carga e a energia potencial elétrica do capacitor.

Solução:
Para a resolução de exercícios com capacitores em circuitos elétricos, admitimos que o capacitor já esteja carregado, isto é, não nos preocupamos com o fenômeno transitório de carga do capacitor. No trecho de circuito onde está o capacitor, não passa corrente contínua. Assim, inicialmente esse trecho pode ser retirado, e resolve-se o circuito restante. Em seguida, o trecho é reconsiderado para o cálculo de carga e energia do capacitor.

Pela lei de Pouillet, temos:

$$i = \frac{E}{\Sigma R} \Rightarrow i = \frac{12}{1 + 2 + 1 + 2} \Rightarrow i = 2\ \text{A}$$

A ddp no capacitor é a mesma no resistor de 1 Ω situado entre A e B:

$$U = R \cdot i \Rightarrow U = 1 \cdot 2 \Rightarrow U = 2\ \text{V}$$

De $Q = CU$, temos: $Q = 10^{-6} \cdot 2 \Rightarrow \boxed{Q = 2 \cdot 10^{-6}\ \text{C}}$

Como $W = \dfrac{QU}{2}$, temos: $W = \dfrac{2 \cdot 10^{-6} \cdot 2}{2} \Rightarrow \boxed{W = 2 \cdot 10^{-6}\ \text{J}}$

Resposta: $2 \cdot 10^{-6}$ C; $2 \cdot 10^{-6}$ J

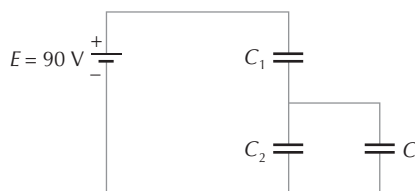
EXERCÍCIOS PROPOSTOS

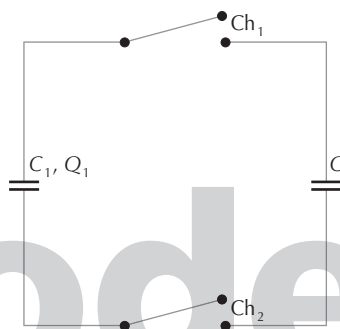
P. 288 Três capacitores de capacitâncias 6 μF, 3 μF e 2 μF são associados em série. Fornecendo-se à associação a carga de 12 μC, determine:

a) a carga e a ddp em cada capacitor;
b) a ddp da associação;
c) a capacitância do capacitor equivalente;
d) a energia potencial elétrica da associação.

P. 289 Três capacitores de capacitâncias 6 μF, 3 μF e 2 μF são associados em paralelo. Aplicando-se aos terminais da associação a ddp de 10 V, determine:

a) a carga e a ddp em cada capacitor;
b) a carga da associação;
c) a capacitância do capacitor equivalente;
d) a energia potencial elétrica da associação.

P. 290 (UFPE) No circuito ao lado, os três capacitores têm a mesma capacitância $C_1 = C_2 = C_3 = 1$ μF. Qual a diferença de potencial nos terminais do capacitor C_1, em volts?

P. 291 Na figura, somente o capacitor de capacitância $C_1 = 4$ μF está eletrizado com carga $Q_1 = 12$ μC. As chaves Ch_1 e Ch_2 são fechadas. Sendo $C_2 = 2$ μF, determine, após o equilíbrio eletrostático ser atingido:

a) a nova ddp entre as armaduras dos capacitores;
b) as novas cargas.

P. 292 Um capacitor com 100 V de ddp entre as armaduras e capacitância de 1.000 μF é descarregado por meio de um resistor imerso em 5 g de água a 20 °C. Determine a temperatura final da água. Sabe-se que 1 cal = 4,19 J e o calor específico da água é 1 cal/g · °C.

P. 293 Determine a carga armazenada pelo capacitor nos circuitos:

a)

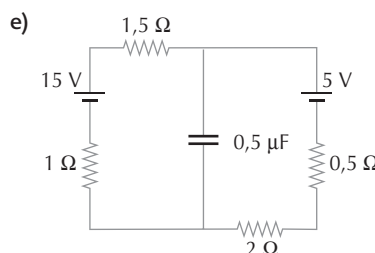
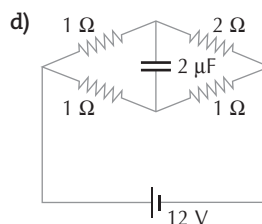
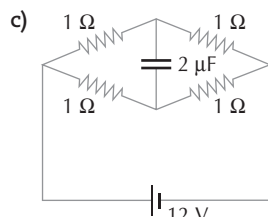
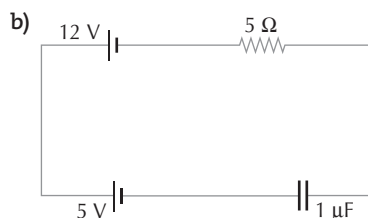
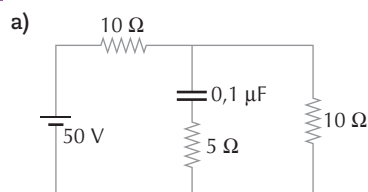
b)

c)

d)

e)

Seção 12.4

Carga e descarga de um capacitor

Objetivos

- Analisar o circuito utilizado para o estudo da carga e da descarga de um capacitor.
- Analisar os gráficos da carga e da ddp em função do tempo durante a carga e a descarga de um capacitor.

Termos e conceitos

- **constante de tempo**

Um gerador de força eletromotriz E e resistência interna desprezível é ligado a um resistor de resistência R e a um capacitor de capacitância C, inicialmente descarregado, sendo que a chave Ch pode ocupar as posições 1 ou 2 (**fig. 13**).

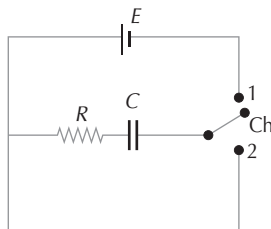



Figura 13. Circuito utilizado para o estudo da carga e da descarga no capacitor.

Colocando-se a chave na posição 1, inicia-se o processo transitório de carga do capacitor. Quando plenamente carregado, a tensão (ddp) entre as armaduras do capacitor é E e sua carga elétrica Q. A carga elétrica que o capacitor vai gradativamente armazenando e a tensão elétrica (ddp) entre suas armaduras variam com o tempo (**fig. 14**).

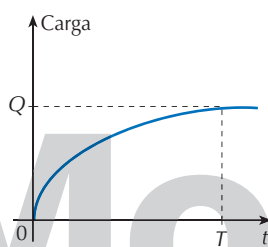
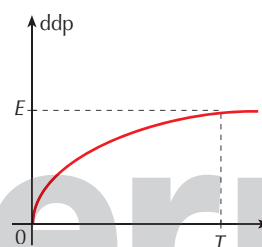



Figura 14.

Quando a tensão entre as armaduras do capacitor atinge o valor E, cessa a movimentação de cargas elétricas no circuito. Quanto maior o valor da resistência R, mais tempo demora para o processo se completar.

Verifica-se que o instante T em que o processo de carga termina é dado por $T \simeq 10RC$.

Depois de se carregar plenamente, o capacitor bloqueia a passagem de corrente contínua, funcionando como uma chave aberta.

A seguir, passando-se a chave Ch da posição 1 para a posição 2, inicia-se o processo da descarga do capacitor. Nessas condições, a carga elétrica do capacitor e a tensão elétrica (ddp) entre suas armaduras decrescem com o decorrer do tempo (**fig. 15**).

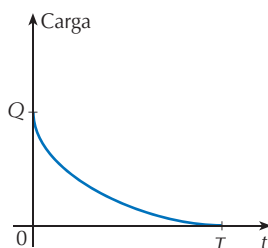
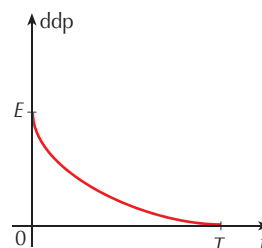



Figura 15.

Entre na rede No endereço eletrônico http://www.micro.magnet.fsu.edu/electromag/java/capacitor/index.html (acesso em agosto/2009), você pode simular a carga e a descarga de um capacitor.

Observação

Sendo Q a carga elétrica do capacitor no instante $t = 0$, a carga elétrica $Q(t)$ do capacitor no instante t é dada por:

$$Q(t) = Q \cdot e^{\frac{-t}{RC}} \text{ (em que e} \simeq 2{,}7 \text{ é a base do logaritmo natural)}$$

A carga elétrica $Q(t)$ decresce exponencialmente com o decorrer do tempo. O produto RC, indicado por τ, é denominado **constante de tempo**:

$$\tau = RC$$

- No instante $t = \tau$, a carga elétrica $Q(t)$ do capacitor é:

$$Q(\tau) = Q \cdot e^{-1} \simeq 0{,}370Q$$

- Para $t = 2\tau$, temos:

$$Q(2\tau) = Q \cdot e^{-2} = 0{,}135Q$$

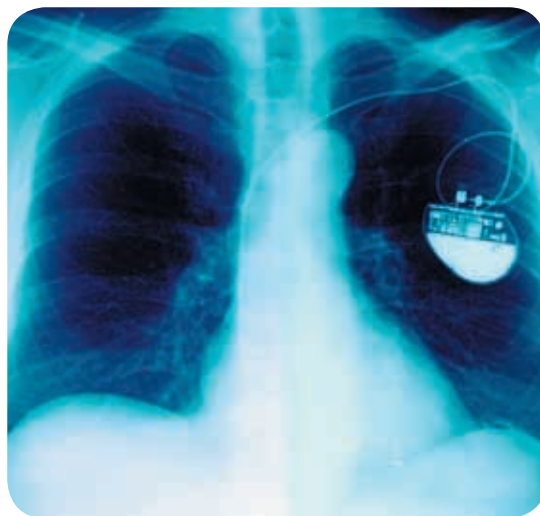
- Para $t = 10\tau$, temos:

$$Q(10\tau) = Q \cdot e^{-10} = 0{,}000045Q$$

Nesse instante, o capacitor está praticamente descarregado.

Vimos que o capacitor bloqueia corrente contínua. Se o gerador fosse de corrente alternada, o capacitor deixaria passar corrente de alta frequência e bloquearia a corrente alternada de baixa frequência. Daí o seu uso como seletor de frequências, permitindo, por exemplo, em aparelhos de som, separar os sons de altas frequências (sons agudos) dos de baixas frequências (sons graves).

O processo carga/descarga de um capacitor confere-lhe inúmeras aplicações. Por exemplo, o marca-passo cardíaco possui um circuito resistor/capacitor que tem a função de regular o ciclo de batimentos do coração. O temporizador dos limpadores de para-brisa dos automóveis também usa a carga/descarga de um capacitor em seu funcionamento.

Quando ocorre uma falha no bombeamento de sangue no coração, o desfibrilador – que fornece descargas elétricas provenientes de um capacitor – é utilizado para estimular o músculo cardíaco a retomar seu ritmo normal.

Pessoas portadoras de algum tipo de arritmia cardíaca têm os batimentos do coração controlados pela descarga elétrica de um marca-passo.

Conteúdo digital Moderna PLUS http://www.modernaplus.com.br
A Física em nosso Mundo: *O desfibrilador elétrico*

Seção 12.5

Dielétricos

Objetivos

- Compreender o conceito de dielétrico.
- Analisar as características de um capacitor com um dielétrico.
- Compreender como acontece a polarização de um dielétrico.
- Definir constante dielétrica de um isolante.
- Conceituar rigidez dielétrica de um isolante.

Termos e conceitos

- moléculas polares
- moléculas não polares

Considere um capacitor plano a vácuo (permitividade absoluta ε_0) de capacitância $C_0 = \varepsilon_0 \cdot \frac{A}{d}$. Seja U_0 a ddp de um gerador que o eletriza com carga Q. Após ser carregado, desliga-se o capacitor do gerador. A intensidade do campo elétrico entre as armaduras é $E_0 = \frac{U_0}{d}$ (**fig. 16**).

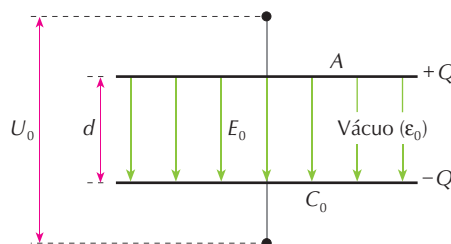



Figura 16. Capacitor a vácuo.

Denominam-se **dielétricos** ou **isolantes** as substâncias que não conduzem corrente elétrica, por não existirem cargas elétricas livres em seu interior.

Preenchendo o espaço entre as armaduras com um dielétrico (**fig. 17**), a experiência mostra que a capacitância do capacitor aumenta. A relação entre a capacitância C do capacitor com dielétrico e a capacitância C_0 do capacitor a vácuo é uma constante característica do dielétrico.

Essa constante é denominada **constante dielétrica do isolante** e indicada por K. Assim:

$$\frac{C}{C_0} = K$$

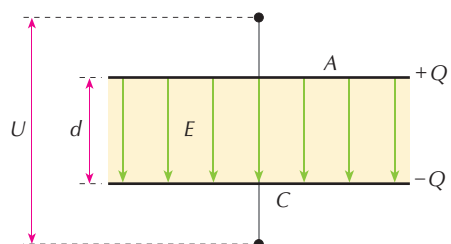



Figura 17. Capacitor com dielétrico.

A tabela abaixo apresenta valores de K para alguns dielétricos.

Dielétrico	K
vácuo	1
ar	1,0006
água pura	81
papel	3,5
mica	5,4

Observe que K é uma grandeza adimensional. Para os meios materiais, K é maior do que 1. Para o vácuo, $K = 1$ e, para o ar, K é praticamente 1.

De $\frac{C}{C_0} = K$, temos:

$$C = KC_0$$

A capacitância do capacitor com um dielétrico de constante K entre as armaduras é K vezes maior que a capacitância do mesmo capacitor a vácuo.

A carga elétrica do capacitor, após a introdução do dielétrico, permanece a mesma, pois o capacitor foi desligado do gerador. Nessas condições, a mudança da capacitância implica a mudança da ddp entre as armaduras, passando de U_0 para U. Assim, de $C = \frac{Q}{U}$ e $C_0 = \frac{Q}{U_0}$, temos:

$$\frac{Q}{U} = K \cdot \frac{Q}{U_0} \Rightarrow U = \frac{U_0}{K}$$

A ddp entre as armaduras do capacitor, com dielétrico de constante K, é K vezes menor que a ddp do mesmo capacitor a vácuo.

A mudança da ddp implica a mudança de intensidade do campo elétrico.

De $U = Ed$ e $U_0 = E_0d$, decorre:

$$Ed = \frac{E_0d}{K} \Rightarrow E = \frac{E_0}{K}$$

A intensidade do campo elétrico entre as armaduras do capacitor, com dielétrico de constante K, é K vezes menor que a intensidade do campo elétrico entre as armaduras do mesmo capacitor a vácuo.

Em resumo, a introdução de um dielétrico entre as armaduras de um capacitor desligado do gerador aumenta a capacitância, diminui a ddp e diminui a intensidade do campo elétrico.

Analogamente, seja $F_{e(0)}$ a intensidade da força elétrica entre duas cargas elétricas puntiformes colocadas no vácuo. Ao serem colocadas em um dielétrico de constante K, nas mesmas condições, teremos:

$$F_e = \frac{F_{e(0)}}{K}$$

A intensidade da força elétrica entre duas cargas elétricas puntiformes, situadas num dielétrico de constante K, é K vezes menor que a intensidade da força elétrica entre essas cargas no vácuo e à mesma distância.

1 Polarização do dielétrico

As moléculas de um dielétrico podem ser classificadas em dois tipos:

a) **polares**: aquelas que, normalmente, têm uma distribuição não simétrica de cargas elétricas no seu interior.

b) **não polares**: aquelas que têm uma distribuição simétrica de cargas elétricas no seu interior.

Coloquemos um dielétrico de moléculas polares entre as armaduras de um capacitor plano, inicialmente neutro (**fig. 18A**). As moléculas polares têm uma extremidade eletrizada positivamente e a outra, negativamente, estando orientadas ao acaso. Eletrizando-se o capacitor, o campo elétrico entre as armaduras alinha as moléculas polares, conforme a **figura 18B**.

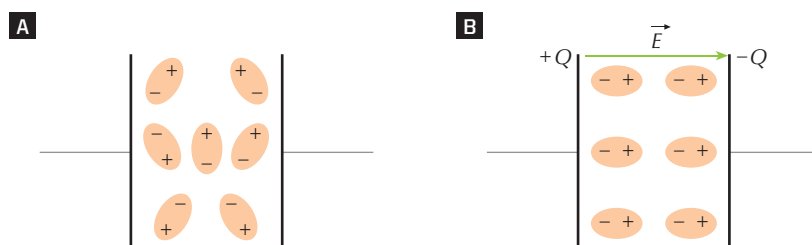



Figura 18. Dielétrico de moléculas polares.

Em um dielétrico de moléculas não polares, a distribuição simétrica de cargas (**fig. 19A**) é modificada pelo campo elétrico, de modo que ocorre uma efetiva separação de cargas (**fig. 19B**). Novamente as moléculas têm suas extremidades eletrizadas e alinhadas sob a ação do campo elétrico.

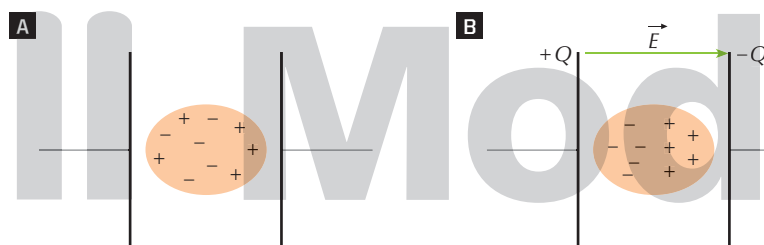



Figura 19. Dielétrico de moléculas não polares.

O fenômeno é denominado **polarização do dielétrico**. Em qualquer caso, o campo elétrico resultante entre as armaduras do capacitor é menor do que se entre elas existisse o vácuo. Esse fato ocorre porque, no interior do dielétrico, há uma compensação entre as cargas positivas e negativas, mas, nas superfícies do dielétrico, formam-se duas distribuições de cargas $-Q_{pol.}$ e $+Q_{pol.}$, chamadas **cargas de polarização** (**fig. 20**). Essas cargas diminuem o campo elétrico resultante no interior do dielétrico.

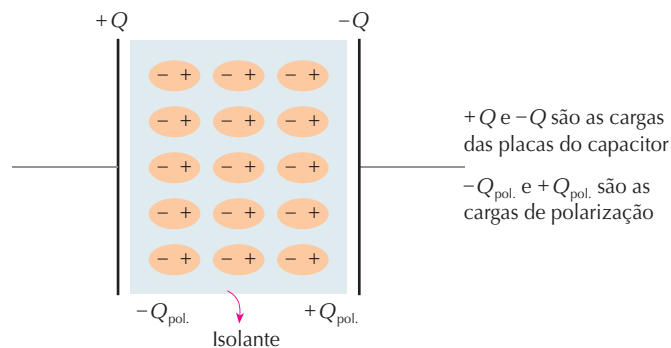
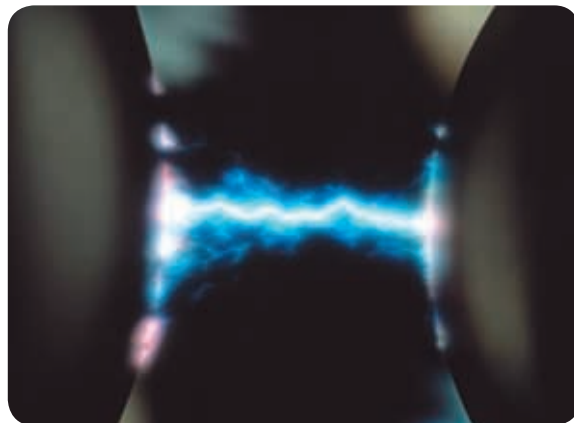



Figura 20.

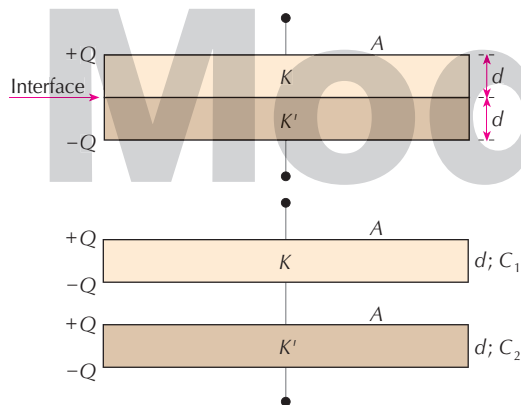
A **constante dielétrica** K de uma substância é a medida de sua propriedade de reduzir a intensidade de um campo elétrico estabelecido no seu interior.

2 Rigidez dielétrica de um isolante

Aumentando-se a ddp em um capacitor, aumenta-se a intensidade do campo entre suas armaduras. Um campo elétrico suficientemente intenso pode arrancar elétrons dos átomos do dielétrico, ocasionando sua ionização.

O **valor máximo do campo elétrico** que um isolante suporta sem se ionizar recebe o nome de **rigidez dielétrica do isolante**. Superada a rigidez dielétrica do isolante que preenche o espaço entre as armaduras, tem-se uma faísca entre elas, o que danifica o capacitor.

Quando é superada a rigidez dielétrica do isolante, salta uma faísca.

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

R. 122 Dois dielétricos de constantes K e K' são colocados entre as armaduras de um capacitor plano, conforme a figura. Determine a capacitância do capacitor assim formado.

Solução:
Nesse caso, imagina-se uma película muito delgada na interface que separa os isolantes com cargas $-Q$ e $+Q$, de modo que o sistema se comporte como uma associação em série.
Sejam C_1 e C_2 as capacitâncias dos capacitores associados.
Sabendo-se que a capacitância de um capacitor com um dielétrico de constante K é K vezes maior que sua capacitância no vácuo, temos:

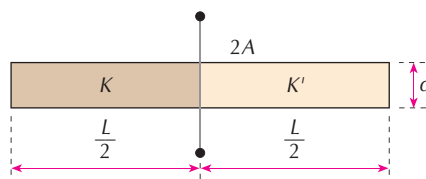
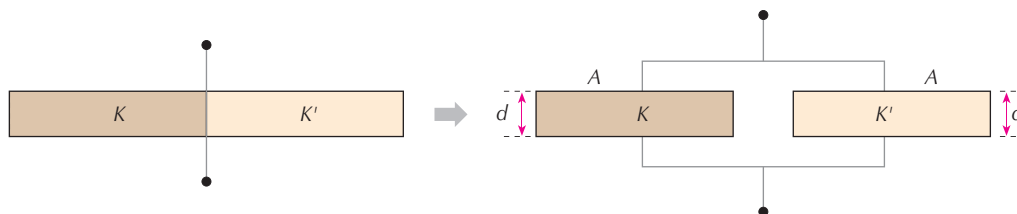
$$C_1 = K \cdot \frac{\varepsilon_0 A}{d} \quad \text{e} \quad C_2 = K' \cdot \frac{\varepsilon_0 A}{d}$$

A capacitância equivalente de dois capacitores em série é o quociente do produto pela soma das capacitâncias.
Assim, temos:

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \Rightarrow C = \frac{K \cdot \frac{\varepsilon_0 A}{d} \cdot K' \cdot \frac{\varepsilon_0 A}{d}}{K \cdot \frac{\varepsilon_0 A}{d} + K' \cdot \frac{\varepsilon_0 A}{d}} \Rightarrow \boxed{C = \left(\frac{KK'}{K + K'}\right) \cdot \frac{\varepsilon_0 A}{d}}$$

Resposta: $C = \left(\frac{KK'}{K + K'}\right) \cdot \frac{\varepsilon_0 A}{d}$

V3_P1_UN_B_CAP_12b.indd 287 17.09.09 18:30:23

R. 123 Dois dielétricos de constantes K e K' são colocados entre as armaduras de um capacitor plano, conforme a figura. Determine a capacitância do capacitor assim formado.

Solução:
O sistema equivale a dois capacitores em paralelo, conforme mostramos a seguir.

Nessas condições: $C = K \cdot \frac{\varepsilon_0 A}{d} + K' \cdot \frac{\varepsilon_0 A}{d} \Rightarrow \boxed{C = (K + K') \cdot \frac{\varepsilon_0 A}{d}}$

Resposta: $C = (K + K') \cdot \frac{\varepsilon_0 A}{d}$

O *flash* eletrônico

Esquematicamente, o *flash* eletrônico de uma máquina fotográfica funciona em duas fases, como é mostrado a seguir.

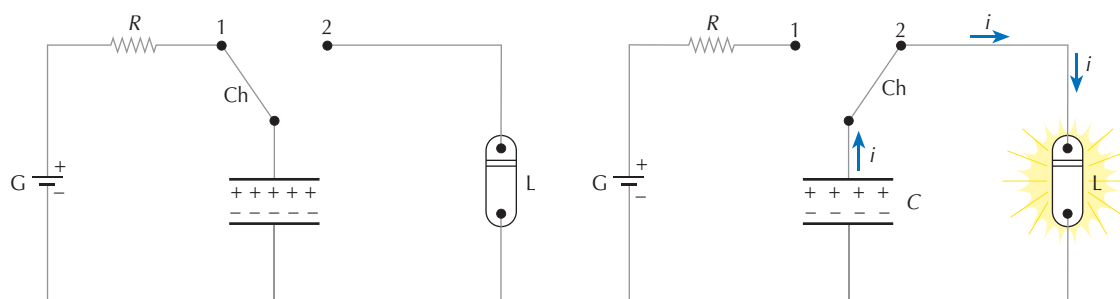
1. Fase de carga do capacitor

Ao se ligar o gerador às placas do capacitor (chave na posição 1) inicia-se uma movimentação de cargas que carrega o capacitor. A lâmpada L do *flash* não se acende, pois não participa do circuito nessa fase.

2. Fase de disparo do *flash*

Quando a chave passa para a posição 2, o capacitor se descarrega. Então, a lâmpada do *flash* é atravessada por uma corrente elétrica de grande intensidade e muito rápida.

A luz brilhante da lâmpada dura apenas uma fração de segundo. Por isso, é necessário um mecanismo de sincronização, tal que a passagem da chave Ch para a posição 2 ocorra exatamente no instante em que o obturador da câmara fotográfica é aberto. Isso é feito de forma tal que o disparo da câmara produza simultaneamente o disparo do *flash*.

Os circuitos estão extremamente simplificados. Não apresentamos nos esquemas o circuito eletrônico, que eleva a tensão aplicada pelo gerador G (pilhas ou bateria) a um valor suficientemente alto para o trabalho da lâmpada de xenônio, nem o circuito que inicia a ionização do gás no interior da lâmpada.

EXERCÍCIOS PROPOSTOS DE RECAPITULAÇÃO

P. 294 Tem-se um capacitor plano eletrizado com carga $Q = 2 \cdot 10^{-7}$ C e sob ddp $U = 10^3$ V. Estando o capacitor desligado de qualquer gerador, duplica-se a distância entre as armaduras. Determine:

a) a nova ddp do capacitor;

b) as energias eletrostáticas inicial e final, explicando a origem da eventual diferença;

c) a nova carga do capacitor se a distância entre as armaduras fosse duplicada sem desligar o gerador.

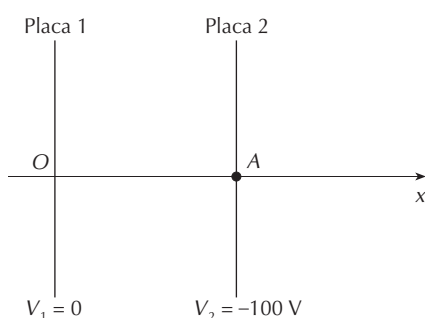
P. 295 (Unicamp-SP) Um raio entre uma nuvem e o solo ocorre devido ao acúmulo de carga elétrica na base da nuvem, induzindo uma carga de sinal contrário na região do solo abaixo da nuvem. A base da nuvem está a uma altura de 2 km e sua área é de 200 km^2. Considere uma área idêntica no solo abaixo da nuvem. A descarga elétrica de um único raio ocorre em 10^{-3} s e apresenta uma corrente de 50 kA. Considerando $\varepsilon_0 = 9 \cdot 10^{-12}$ F/m, responda:

a) Qual é a carga armazenada na base da nuvem no instante anterior ao raio?

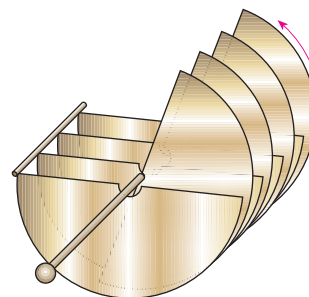
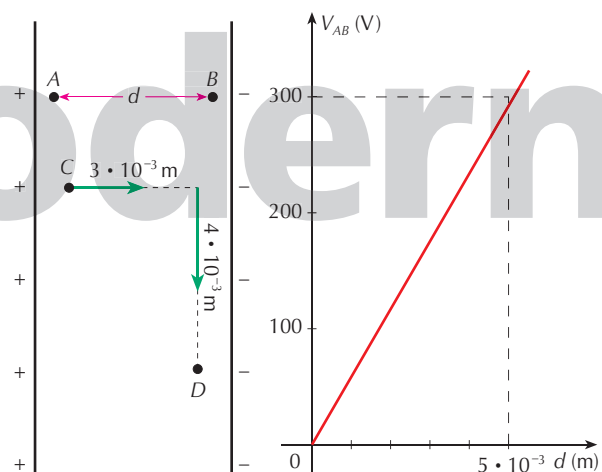
b) Qual é a capacitância do sistema nuvem-solo nesse instante?

c) Qual é a diferença de potencial entre a nuvem e o solo imediatamente antes do raio?

P. 296 Um capacitor de 10 μF, armazenando 5 μJ de energia, é ligado aos terminais de um capacitor neutro de 40 μF. Calcule a energia final do sistema.

P. 297 Um capacitor a vácuo é formado por duas placas verticais separadas pela distância $OA = 1{,}0$ cm. A placa 1 possui potencial zero e a placa 2, potencial −100 V. No interior do capacitor, o campo elétrico é uniforme e paralelo ao eixo x.

a) Faça um gráfico da energia potencial de um elétron em função da abscissa x (no sentido de O para A).

b) Faça um gráfico da energia cinética de um elétron em função de x, sabendo-se que ele parte do ponto O com energia cinética inicial $E_0 = 80 \cdot 10^{-19}$ J, tendo velocidade no sentido Ox.
(carga elétrica do elétron $= -1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C)

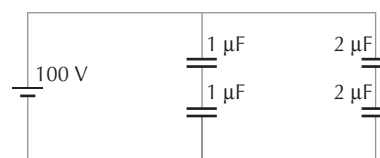
P. 298 Na figura, tem-se um capacitor variável. As armaduras são ligadas alternadamente entre si. Um conjunto é fixo e o outro gira em torno do eixo indicado. A capacitância varia de $0{,}5 \cdot 10^{-3}$ μF a $1{,}0 \cdot 10^{-3}$ μF entre as duas posições extremas. Na posição de máxima capacitância, o capacitor é carregado sob 500 V e, em seguida, desligado do gerador. Gira-se o botão ligado às armaduras móveis até que a capacitância atinja seu valor mínimo. Calcule, para essa posição, a ddp entre as armaduras.

P. 299 (Ufop-MG) Nas figuras dadas, estão representados um capacitor de placas paralelas e o gráfico da diferença de potencial entre dois pontos, A e B, do seu interior em função da distância *d* entre eles.

a) Desenhe uma seta que represente a direção e o sentido do vetor campo elétrico existente entre as placas.

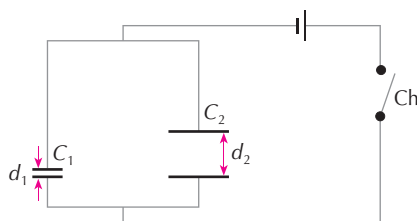
b) Calcule o módulo do vetor campo elétrico.

c) Calcule o trabalho para transportar, em equilíbrio, uma carga de prova positiva $q = 2{,}0 \cdot 10^{-9}$ C, do ponto C até o ponto D, segundo a trajetória indicada na figura.

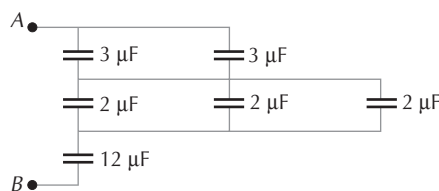
P. 300 Para o esquema dado, determine:

a) a carga total armazenada pela associação;

b) a energia potencial elétrica total armazenada pela associação.

P. 301 (UFPE) No circuito da figura os capacitores de placas paralelas C_1 e C_2 têm placas de mesma área separadas pelas distâncias d_1 e d_2, respectivamente. Muito tempo após a chave Ch ter sido fechada, as cargas nas placas desses capacitores já atingiram seus valores máximos, Q_1 e Q_2, respectivamente.

Se $d_2 = 2d_1$, determine o valor da razão $\frac{Q_1}{Q_2}$.

P. 302 Considere a associação esquematizada. Determine:

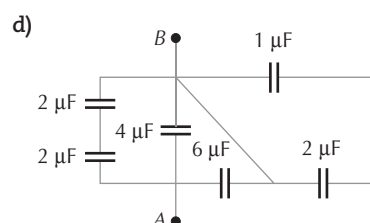
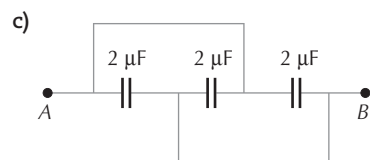
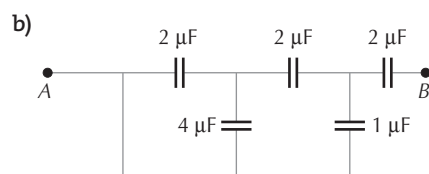
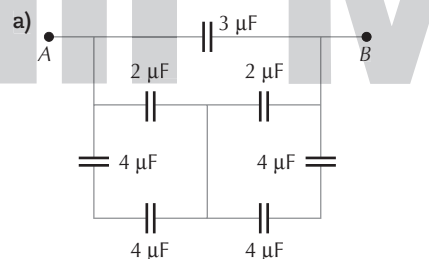
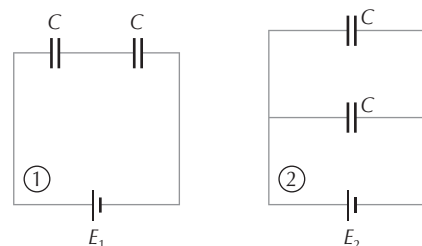
a) a capacitância equivalente entre A e B;

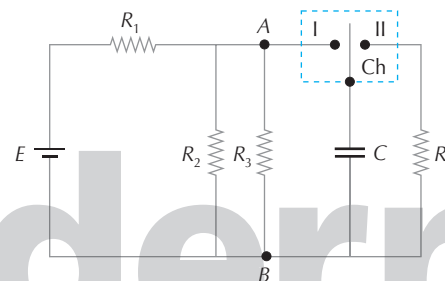
b) a carga e a ddp de cada capacitor quando se submete a associação a uma ddp de 50 V.

P. 303 Determine a capacitância equivalente entre os extremos A e B das associações abaixo.

a)

b)

c)

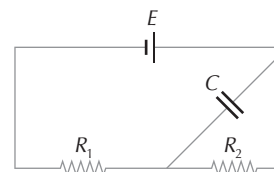
d)

P. 304 (UFPE) Nos circuitos 1 e 2, os capacitores C são todos iguais, enquanto a relação entre as forças eletromotrizes é dada por $\frac{E_2}{E_1} = 2$. Na situação estacionária, com os capacitores à carga máxima, determine a razão $\frac{W_2}{W_1}$ entre as energias totais armazenadas no sistema de capacitores de cada circuito.

P. 305 (Ufes) No circuito mostrado na figura, temos que:

- E é a fem da fonte de tensão
- C é a capacitância do capacitor
- $R_1 = R$, $R_2 = \frac{3R}{2}$, $R_3 = 3R$ e $R_4 = R$

Baseando-se nessas informações e considerando que o capacitor se encontra inicialmente descarregado, determine:

a) a corrente que passa na resistência R_1, quando a chave Ch estiver aberta;

b) a carga armazenada no capacitor, quando a chave Ch estiver fechada na posição I e o capacitor estiver totalmente carregado;

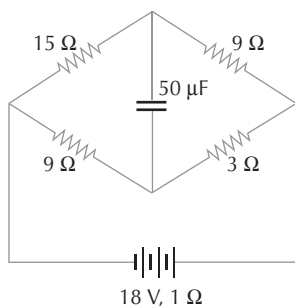
c) a energia total que será dissipada na resistência R_4, após o capacitor ter sido totalmente carregado e a chave Ch ter sido comutada para a posição II.

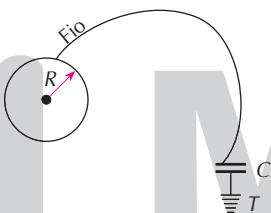
P. 306 (UFBA) O circuito da figura foi montado num laboratório sobre uma placa própria para conexões. A fonte de tensão tem resistência interna desprezível e o valor de E é 16 V. O capacitor (C = 3 μF) encontra-se carregado com 36 μC. Determine, em ohms, o valor da resistência R_1 para que o circuito seja atravessado por corrente 2 A.

P. 307 Uma pilha, carregando um capacitor de 1 μF, estabelece uma carga de $108 \cdot 10^{-8}$ C. A mesma pilha, sendo aplicada a um resistor de resistência 10 Ω, faz circular uma corrente de 100 mA. Qual a fem e a resistência interna da pilha?

V3_P1_UN_B_CAP_12b.indd 290 17.09.09 18:30:29

P. 308 No circuito indicado, a fem da bateria é de 18 V e sua resistência interna é de 1 Ω; a capacitância do capacitor é de 50 μF. Determine:

a) a carga do capacitor;

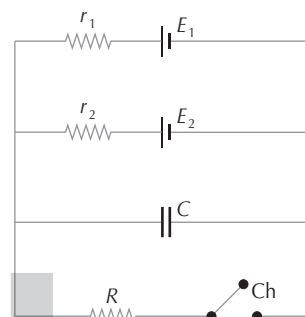
b) o valor da resistência que deveria substituir uma das resistências de 9 Ω para que o capacitor não se carregasse.

P. 309 (UFC-CE) A figura abaixo mostra uma esfera condutora, de raio R, ligada por um fio muito longo e de capacitância nula a uma das placas de um capacitor plano de placas paralelas e de capacitância C. A outra placa do capacitor está ligada à terra no ponto T (considere nulo o potencial em T).

Fio R C T

Antes de o fio ser ligado, o capacitor estava eletricamente neutro e a esfera estava eletrizada, de modo que o potencial $V_0 = k \cdot \frac{Q_0}{R}$, na sua superfície, era de $3{,}0 \cdot 10^5$ volts. Suponha que o sistema (esfera + fio + capacitor) está no vácuo e que a constante k é igual a $9{,}0 \cdot 10^9$ N · m²/C².

O raio R é igual a 0,30 m e a capacitância C é igual a 300 pF (1 pF = $1{,}0 \cdot 10^{-12}$ F). Restabelecido o equilíbrio, após o fio ser ligado, determine:

a) o valor da carga do capacitor, expresso em μC (1 μC = $1{,}0 \cdot 10^{-6}$ C);

b) a diferença de potencial entre as placas do capacitor, medida em volts.

P. 310 No circuito da figura a seguir, a capacitância do capacitor C é de 10 μF e as baterias E_1 e E_2 têm 6 V e 3 V e resistências internas 1 Ω e 0,5 Ω, respectivamente. A resistência R é de 3 Ω.

Determine a carga do capacitor:

a) com a chave Ch ligada;

b) com a chave Ch desligada.

TESTES PROPOSTOS

T. 255 (Mackenzie-SP) Uma esfera condutora de raio 9,0 cm que se encontra no vácuo ($k_0 = 9 \cdot 10^9$ N · m²/C²) é eletrizada e adquire um potencial de 100 V. Com a mesma carga elétrica dessa esfera, um condensador plano de 1,0 nF criaria entre suas placas, distanciadas de 1,0 mm, um campo elétrico uniforme de intensidade:

a) $1 \cdot 10^{-4}$ V/m
b) $1 \cdot 10^{-1}$ V/m
c) $1 \cdot 10^{2}$ V/m
d) $1 \cdot 10^{3}$ V/m
e) $1 \cdot 10^{5}$ V/m

T. 256 (Olimpíada Paulista de Física) O fluxo de íons através de membranas ou vasos sanguíneos altera o valor da capacitância e muda as propriedades de seus tecidos. A aplicação desse estudo valeu o prêmio Nobel de Medicina de 1998. Muitas membranas, como as que envolvem os axônios, das células do sistema nervoso, têm carga positiva na parte externa e negativa na interna, comportando-se como um capacitor, cuja capacitância vale 10^{-8} F. Qual é a carga deste capacitor, se a diferença de potencial é da ordem de 50 mV?

a) $50 \cdot 10^{-8}$ C
b) $5 \cdot 10^{-8}$ C
c) $50 \cdot 10^{-10}$ C
d) $50 \cdot 10^{-9}$ C
e) $5 \cdot 10^{-10}$ C

T. 257 (Univali-SC) A carga de um condensador sofre um aumento de $6 \cdot 10^{-5}$ C quando a ddp entre seus terminais aumenta de 50 V para 60 V. Esse condensador tem capacidade de:

a) 12 μF
b) 2 μF
c) 1 μF
d) 10 μF
e) 6 μF

T. 258 (Unitins-TO) Para aumentar a capacitância de um capacitor plano, deve-se:

a) substituir o dielétrico por outro, de constante dielétrica menor.

b) substituir o dielétrico por outro, de constante dielétrica maior.

c) reduzir a área das placas.

d) aumentar a distância entre as placas.

e) aumentar a diferença de potencial elétrico (ddp) entre as placas.

T. 259 Uma diferença de potencial constante é mantida sobre um capacitor de placas paralelas. Então, a carga elétrica armazenada no capacitor:

I. é proporcional à área das placas;

II. é inversamente proporcional à distância entre as placas;

III. diminui, se for colocado um isolante entre as placas.

Está(ão) correta(s):

a) apenas I.
b) apenas II.
c) apenas III.
d) apenas I e II.
e) apenas II e III.

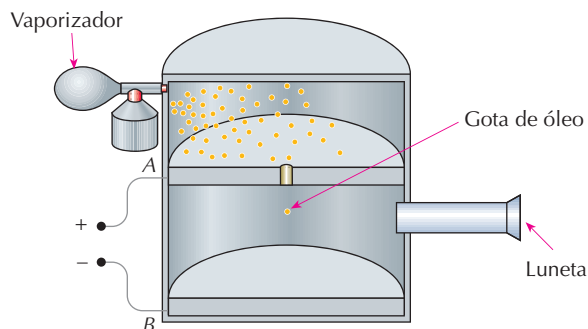
T. 260 (UFPR) A invenção dos capacitores ocorreu há mais de dois séculos, conforme registrado na literatura especializada. Embora os princípios básicos de projeto e funcionamento dos capacitores tenham permanecido os mesmos, a utilização de novos materiais e tecnologias de fabricação permitiram melhorar a eficiência e reduzir as dimensões desses componentes. A miniaturização foi necessária para que eles pudessem se adequar à evolução de outros dispositivos da eletrônica, como os circuitos integrados. Com relação aos princípios básicos dos capacitores, assinale a alternativa correta.

a) A capacitância de um capacitor aumenta quando é inserido um material dielétrico entre suas placas.
b) Num capacitor de placas paralelas, quanto maior a área das placas, menor será a capacitância.
c) A capacitância pode ser expressa no SI em V/C.
d) Cargas elétricas de mesmo sinal são armazenadas nas duas placas do capacitor.
e) Os capacitores podem armazenar corrente elétrica.

T. 261 (UFBA) Um capacitor de placas planas e paralelas, cujo dielétrico é o ar, está submetido a uma ddp de 120 V. Considerando-se sua capacitância igual a $2 \cdot 10^{-6}$ F, pode-se afirmar:

(01) A intensidade do campo elétrico, no interior do capacitor, independe da ddp e da distância entre as placas.
(02) O capacitor terá sua capacitância duplicada, caso a distância entre suas placas seja reduzida à metade.
(04) Sendo a carga elementar igual a $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C, descarregando-se o capacitor, $8 \cdot 10^{12}$ elétrons passarão da placa negativa para a placa positiva.
(08) Se um resistor ôhmico for ligado aos terminais do capacitor, $1{,}44 \cdot 10^{-2}$ J serão convertidos em calor.
(16) Introduzindo-se, entre as placas, um dielétrico de constante dielétrica $K = 3$ e mantendo-se a ddp de 120 V, a carga armazenada no capacitor será de $8{,}0 \cdot 10^{-5}$ C se, para o ar, $K = 1$.

Dê como resposta a soma dos números que precedem as afirmativas corretas.

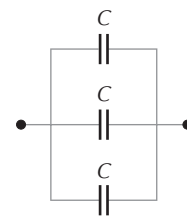
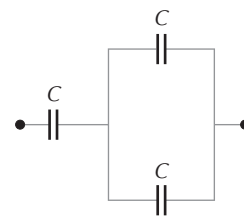
T. 262 (PUC-SP) A figura esquematiza o experimento de Robert Millikan para a obtenção do valor da carga do elétron. O vaporizador borrifa gotas de óleo extremamente pequenas que, no seu processo de formação, são eletrizadas e, ao passar por um pequeno orifício, ficam sujeitas a um campo elétrico uniforme, estabelecido entre as duas placas, *A* e *B*, mostradas na figura.

Variando adequadamente a tensão entre as placas, Millikan conseguiu estabelecer uma situação na qual a gotícula mantinha-se em equilíbrio. Conseguiu medir cargas de milhares de gotículas e concluiu que os valores eram sempre múltiplos inteiros de $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C (a carga do elétron em valor absoluto). Em uma aproximação da investigação descrita, pode-se considerar que uma gotícula de massa $1{,}2 \cdot 10^{-12}$ kg atingiu o equilíbrio entre placas separadas de 1,6 cm, estando sujeita apenas às ações dos campos elétrico e gravitacional ($g = 10$ m/s²). Supondo que entre as placas estabeleça-se uma tensão de $6{,}0 \cdot 10^{2}$ V, o número de elétrons, em excesso na gotícula, será:

a) $2{,}0 \cdot 10^{3}$
b) $4{,}0 \cdot 10^{3}$
c) $6{,}0 \cdot 10^{3}$
d) $8{,}0 \cdot 10^{3}$
e) $1{,}0 \cdot 10^{4}$

T. 263 (ITA-SP) Um catálogo de fábrica de capacitores descreve um capacitor de 25 V de tensão de trabalho e de capacitância 22.000 μF. Se a energia armazenada nesse capacitor se descarrega num motor sem atrito arranjado para levantar um tijolo de 0,5 kg de massa, a altura alcançada pelo tijolo é aproximadamente:

a) 1 km
b) 10 cm
c) 1,4 m
d) 20 cm
e) 2 mm

(Dado: $g = 10$ m/s²)

T. 264 (ITA-SP) Há quatro maneiras possíveis de se ligarem três capacitores iguais. Qual dos itens a seguir apresenta todos os valores corretos?

	Figura I	Figura II	Figura III	Figura IV
a)	$3C$	$3C$	$3C$	$3C$
b)	$\frac{C}{3}$	$3C$	$\frac{3C}{2}$	$\frac{2C}{3}$
c)	$3C$	$\frac{C}{3}$	$\frac{C}{2}$	$2C$
d)	$3C$	$\frac{C}{3}$	$\frac{2C}{3}$	$\frac{3C}{2}$
e)	C	C	C	C

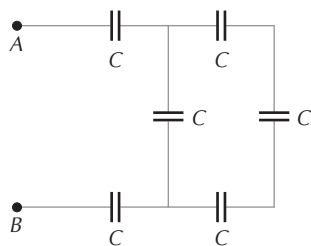
T. 265 (UFC-CE) Três capacitores idênticos, quando devidamente associados, podem apresentar uma capacitância equivalente máxima de 18 μF. A menor capacitância equivalente que podemos obter com esses mesmos três capacitores é, em μF:

a) 8 b) 6 c) 4 d) 2 e) 1

T. 266 (Uespi) São associados os seguintes capacitores: $C_1 = 4{,}0 \cdot 10^{-6}$ F; $C_2 = 2{,}0 \cdot 10^{-6}$ F; $C_3 = 4{,}0 \cdot 10^{-6}$ F e $C_4 = 2{,}0 \cdot 10^{-6}$ F

A capacitância equivalente da associação será igual a:

a) $2{,}0 \cdot 10^{-6}$ F, se todos forem associados em série.
b) $1{,}5 \cdot 10^{-6}$ F, se todos forem associados em paralelo.
c) $3{,}0 \cdot 10^{-6}$ F, se C_1 e C_3 forem associados em série e o resultado associado em paralelo com a série formada por C_2 e C_4.
d) $6{,}0 \cdot 10^{-6}$ F, se C_1 for associado em série com C_2 e o resultado associado em paralelo com os demais.
e) $1{,}0 \cdot 10^{-6}$ F, se C_2 e C_4 forem associados em série e o resultado associado em paralelo com a série formada por C_1 e C_3.

T. 267 (UFJF-MG) Na figura, cada capacitor tem capacitância $C = 11$ μF. Entre os pontos A e B existe a diferença de potencial de 10 V.

Qual é a carga total armazenada no circuito?

a) $3{,}0 \cdot 10^{-5}$ C
b) $4{,}0 \cdot 10^{-5}$ C
c) $5{,}0 \cdot 10^{-5}$ C
d) $6{,}0 \cdot 10^{-5}$ C
e) $7{,}0 \cdot 10^{-5}$ C

T. 268 (E. Naval-RJ) Um capacitor $C_1 = 2$ μF é carregado sob uma ddp de 50 V. Em seguida, é desligado da fonte e ligado em paralelo a um capacitor $C_2 = 4$ μF inicialmente descarregado. Com relação à capacitância equivalente de associação e às novas cargas após a ligação em paralelo, pode-se afirmar que:

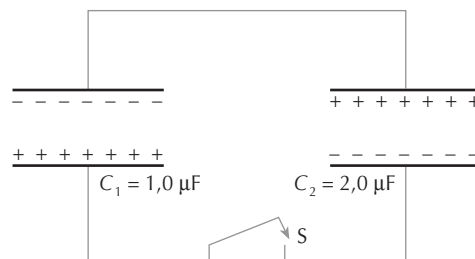
a) $C_{eq.} = \frac{4}{3}$ μF; $Q'_1 = \frac{1}{3} \cdot 10^{-3}$ C; $Q'_2 = \frac{2}{3} \cdot 10^{-3}$ C

b) $C_{eq.} = 6$ μF; $Q'_1 = \frac{2}{3} \cdot 10^{-3}$ C; $Q'_2 = \frac{1}{3} \cdot 10^{-3}$ C

c) $C_{eq.} = \frac{4}{3}$ μF; $Q'_1 = \frac{2}{3} \cdot 10^{-4}$ C; $Q'_2 = \frac{1}{3} \cdot 10^{-4}$ C

d) $C_{eq.} = 6$ μF; $Q'_1 = \frac{1}{3} \cdot 10^{-4}$ C; $Q'_2 = \frac{2}{3} \cdot 10^{-4}$ C

e) $C_{eq.} = \frac{3}{4}$ μF; $Q'_1 = \frac{2}{3} \cdot 10^{-3}$ C; $Q'_2 = \frac{1}{3} \cdot 10^{-3}$ C

T. 269 (ITA-SP) Dois condensadores, um $C_1 = 1{,}0$ μF e outro $C_2 = 2{,}0$ μF, foram carregados a uma tensão de 50 V. Logo em seguida, esses condensadores assim carregados foram ligados conforme mostra a figura.

O sistema atingirá o equilíbrio a uma nova diferença de potencial ΔV entre as armaduras dos condensadores, com carga Q_1 no condensador C_1 e com carga Q_2 no condensador C_2, dadas respectivamente por:

	ΔV (volts)	Q_1 (μC)	Q_2 (μC)
a)	zero	$\frac{50}{3}$	$\frac{100}{3}$
b)	zero	50	100
c)	50	50	100
d)	50	$\frac{50}{3}$	$\frac{100}{3}$
e)	$\frac{50}{3}$	$\frac{50}{3}$	$\frac{100}{3}$

T. 270 (PUC-SP) Sejam três capacitores iguais de capacidade C cada um. Vamos associá-los em série e depois em paralelo. Se aplicarmos uma tensão U na associação paralela, qual deve ser a tensão na associação em série, para que ambas as associações tenham as mesmas cargas?

a) $\frac{U}{9}$ b) $\frac{U}{3}$ c) $1U$ d) $3U$ e) $9U$

T. 271 (Vunesp) Três capacitores, de capacitância C_1, C_2 e C_3, tais que: $C_1 = 2C_2 = 3C_3$ são ligados em paralelo a uma fonte de tensão que fornece uma diferença de potencial V. Sendo Q_1 a carga de C_1, qual das opções abaixo representa a capacitância (C_a), a carga (Q_a) e a diferença de potencial (V_a) da associação?

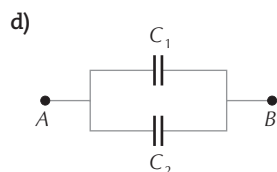
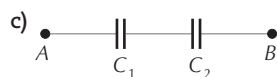
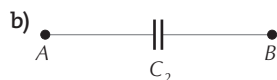
	C_a	Q_a	V_a
a)	$3C_1$	$3Q_1$	3V
b)	$\frac{C_1}{3}$	$\frac{Q_1}{3}$	$\frac{V}{3}$
c)	$5{,}5C_3$	$\frac{11Q_1}{6}$	V
d)	$\frac{11C_1}{6}$	$3Q_1$	V
e)	$\frac{11C_2}{3}$	$\frac{11Q_1}{6}$	3V

T. 272 (Univás-MG) Entre dois pontos, *A* e *B*, é mantida uma ddp constante. Dispondo-se de dois capacitores, de capacitâncias C_1 e C_2, sendo $C_1 > C_2$, identifique em qual das ligações teríamos maior energia elétrica armazenada.

a)

b) A — C_2 — B

c) A — C_1 — C_2 — B

d)

e) A energia elétrica armazenada é a mesma em qualquer uma dessas ligações.

T. 273 (Unemat-MT) Dois capacitores, C_1 e C_2, são constituídos por placas metálicas, paralelas e isoladas por ar. Nos dois capacitores, a distância entre as placas é a mesma, mas a área das placas de C_1 é o dobro da área das placas de C_2. Ambos estão carregados com a mesma carga Q. Se eles forem ligados em paralelo, a carga de C_2 será:

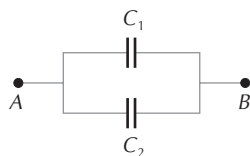
a) 2Q

b) $\frac{3Q}{2}$

c) Q

d) $\frac{2Q}{3}$

e) $\frac{Q}{2}$

T. 274 (Fuvest-SP) Dois capacitores planos C_1 e C_2, com placas de mesma área e com afastamento *d* e 2*d*, respectivamente, são ligados aos terminais A e B, entre os quais existe uma diferença de potencial.

Representando por Q_1 e Q_2 as cargas respectivas dos capacitores e por V_1 e V_2 as diferenças de potencial, respectivamente, entre os terminais desses capacitores, temos:

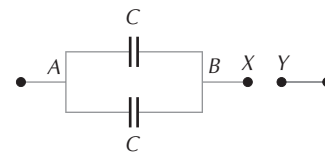
a) $Q_1 = \frac{1}{2}Q_2$ e $V_1 = V_2$

b) $Q_1 = 2Q_2$ e $V_1 = 2V_2$

c) $Q_1 = \frac{1}{2}Q_2$ e $V_1 = \frac{1}{2}V_2$

d) $Q_1 = 2Q_2$ e $V_1 = V_2$

e) $Q_1 = \frac{3}{2}Q_2$ e $V_1 = 2V_2$

T. 275 (UFU-MG) No circuito abaixo, um capacitor ligado entre os pontos X e Y fará com que a diferença de potencial elétrico nos terminais desse capacitor seja o dobro da diferença de potencial elétrico nos terminais A e B.

A capacitância do capacitor ligado entre X e Y vale:

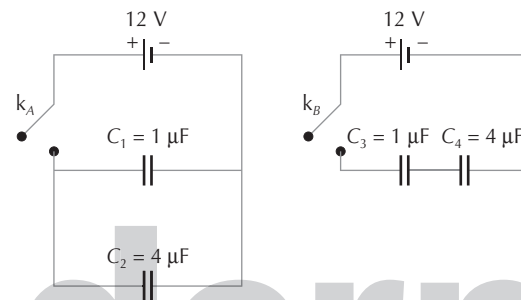
a) $\frac{C}{4}$

b) $\frac{C}{2}$

c) C

d) 2C

e) 3C

T. 276 (Mackenzie-SP) Nas figuras abaixo, estão ilustradas duas associações de capacitores, as quais serão submetidas a uma mesma ddp de 12 V, assim que as respectivas chaves, k_A e k_B, forem fechadas.

As relações entre as cargas elétricas (Q) adquiridas pelos capacitores serão:

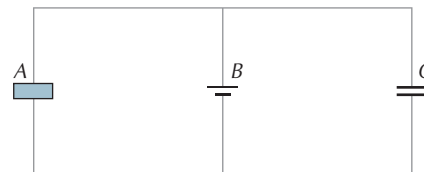
a) $Q_1 = Q_3$ e $Q_2 = Q_4$

b) $Q_1 = Q_3$ e $Q_2 = \frac{1}{5}Q_4$

c) $Q_1 = 4Q_3$ e $Q_2 = 4Q_4$

d) $Q_1 = \frac{5}{4}Q_3$ e $Q_2 = 5Q_4$

e) $Q_1 = \frac{1}{4}Q_3$ e $Q_2 = \frac{1}{4}Q_4$

T. 277 (UFPA) Constroem-se dois capacitores idênticos (A e C). Em um deles é introduzido um dielétrico (A), enquanto o outro (C) contém ar a pressão normal.

Uma bateria *B* carrega os dois capacitores até a mesma diferença de potencial. Nessas condições afirmamos que:

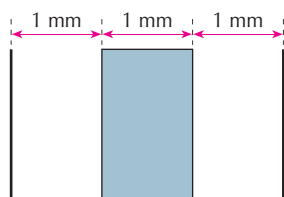
a) a carga acumulada no capacitor *A* é menor que a acumulada no capacitor *C*.

b) a carga acumulada no capacitor *A* é maior que a acumulada no capacitor *C*.

c) o capacitor *A* tem capacitância nula.

d) os capacitores A e C acumulam a mesma carga.

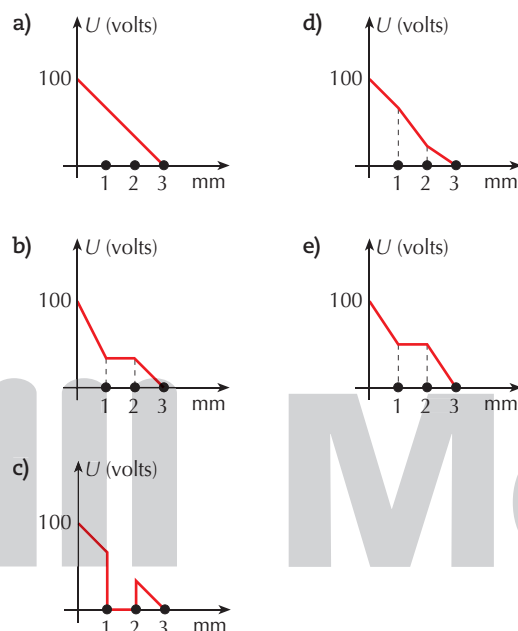
e) os capacitores A e C possuem a mesma capacitância.

T. 278 As placas de um capacitor plano distam 3 mm. O dielétrico é o ar. Introduz-se entre as placas e simetricamente em relação a elas uma lâmina metálica de espessura 1 mm.

Ligando-se os terminais do capacitor a um gerador de 100 volts, o gráfico que melhor representa a variação do potencial entre as placas, em função da distância, é:

a)

d)

b) e)

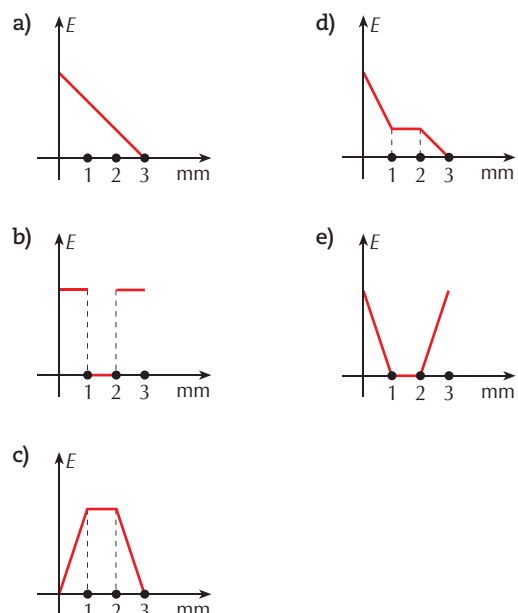
c)

T. 279 Referindo-se ao teste anterior, o gráfico que melhor representa o módulo do campo elétrico entre as placas, em função da distância, é:

a)

d)

b)

e)

c)

T. 280 (Ufla-MG) Em quais dos circuitos abaixo é possível garantir que, transcorrido um intervalo de tempo muito longo após fechar a chave S, todas as lâmpadas estarão acesas? Suponha que a bateria satisfaça as condições necessárias para que as lâmpadas fiquem acesas e não se queimem.

a) I, II, III
b) I, V, VI
c) II, IV, VI
d) III, IV, VI
e) IV, V, VI

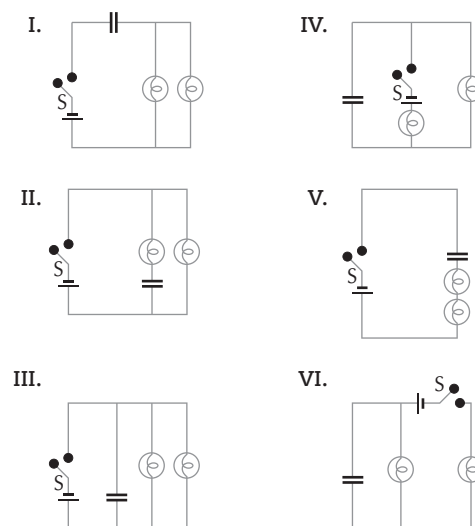
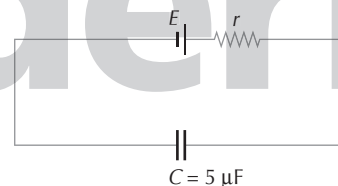
I.

IV.

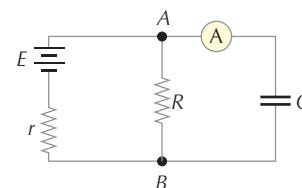
II.

V.

III.

VI.

T. 281 (Mackenzie-SP) No circuito abaixo, o capacitor está carregado com carga $Q = 100\ \mu C$. Substituindo-se esse capacitor por um resistor de 9 Ω, a corrente que atravessa o gerador tem intensidade 2 A.

A resistência interna do gerador vale:

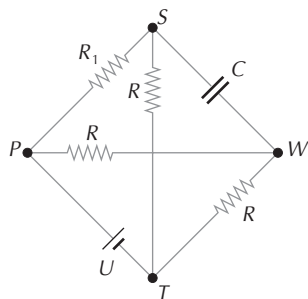
a) 5 Ω
b) 4 Ω
c) 3 Ω
d) 2 Ω
e) 1 Ω

T. 282 (ITA-SP) No circuito mostrado na figura, a força eletromotriz da bateria é $E = 10$ V e a sua resistência interna é $r = 1{,}0\ \Omega$.

Sabendo-se que $R = 4{,}0\ \Omega$ e $C = 2{,}0\ \mu F$ e que o capacitor já se encontra totalmente carregado, considere as seguintes afirmações:

I. A indicação no amperímetro é de 0 A.
II. A carga armazenada no capacitor é 16 μC.
III. A tensão entre os pontos *a* e *b* é 2,0 V.
IV. A corrente na resistência R é 2,5 A.

Das afirmativas mencionadas, é (são) correta(s):

a) apenas I.
b) I e II.
c) I e IV.
d) II e III.
e) II e IV.

T. 283 (ITA-SP) Considere o circuito da figura, assentado nas arestas de um tetraedro, construído com 3 resistores de resistência R, um resistor de resistência R_1, uma bateria de tensão U e um capacitor de capacitância C. O ponto S está fora do plano definido pelos pontos P, W e T.

Supondo que o circuito esteja em regime estacionário, pode-se afirmar que:

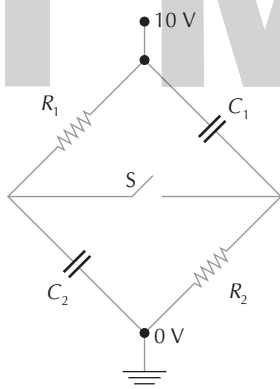
a) a carga elétrica no capacitor é de $2{,}0 \cdot 10^{-6}$ C, se $R_1 = 3R$.

b) a carga elétrica no capacitor é nula, se $R_1 = R$.

c) a tensão entre os pontos W e S é de 2,0 V, se $R_1 = 3R$.

d) a tensão entre os pontos W e S é de 16 V, se $R_1 = 3R$.

e) nenhuma das respostas acima é correta.

T. 284 (ITA-SP) O circuito da figura é composto de duas resistências, $R_1 = 1{,}0 \times 10^3\ \Omega$ e $R_2 = 1{,}5 \times 10^3\ \Omega$, respectivamente, e de dois capacitores, de capacitâncias $C_1 = 1{,}0 \times 10^{-9}$ F e $C_2 = 2{,}0 \times 10^{-9}$ F, respectivamente, além de uma chave S, inicialmente aberta.

Sendo fechada a chave S, a variação da carga ΔQ no capacitor de capacitância C_1, após determinado período, é de:

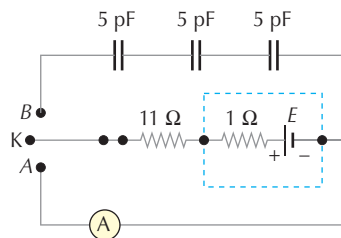
a) $-8{,}0 \times 10^{-9}$ C

b) $-6{,}0 \times 10^{-9}$ C

c) $-4{,}0 \times 10^{-9}$ C

d) $+4{,}0 \times 10^{-9}$ C

e) $+8{,}0 \times 10^{-9}$ C

T. 285 (Mackenzie-SP) Num trabalho experimental, necessitou-se determinar a carga elétrica armazenada nos capacitores do circuito ilustrado abaixo. Quando a chave K foi ligada ao ponto A, o amperímetro ideal acusou uma intensidade de corrente de 500 mA.

Quando a chave K foi ligada ao ponto B, cada um dos capacitores ficou eletrizado com uma carga de:

a) 10 pC

b) 15 pC

c) 20 pC

d) 30 pC

e) 90 pC

T. 286 (ITA-SP) Quantas vezes podemos carregar um condensador de 10 μF com o auxílio de uma bateria de 6,0 V, extraindo dela a energia total de $1{,}8 \cdot 10^4$ joules?

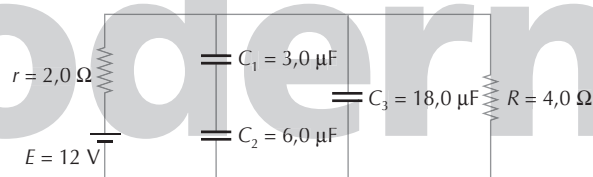
a) $1{,}8 \cdot 10^4$ vezes

b) $1{,}0 \cdot 10^6$ vezes

c) $1{,}0 \cdot 10^8$ vezes

d) $1{,}0 \cdot 10^{10}$ vezes

e) $9{,}0 \cdot 10^{12}$ vezes

T. 287 (Ufal) Considere o circuito constituído por um gerador, um resistor ôhmico e três capacitores, como mostra o esquema.

De acordo com o esquema e os valores nele indicados, analise as afirmações que seguem.

(01) A capacidade do capacitor equivalente à associação de capacitores representada no esquema vale 6,0 μF.

(02) A carga elétrica armazenada no capacitor C_2 é o dobro da armazenada em C_1.

(04) A energia potencial elétrica armazenada em C_3 vale $5{,}76 \cdot 10^{-4}$ J.

(08) A ddp nos terminais do capacitor C_1 vale $\frac{16}{3}$ V.

(16) A potência elétrica total dissipada no circuito vale 24 W.

Dê como resposta a soma dos números que precedem as afirmativas corretas.